

TECHNICKÁ UNIVERZITA
LIBEREC

FAKULTA TEXTILNÍ

**Vnitřní struktura kompozitů s anorganickou
výztuží**

Internal structure of composites with anorganics
reinforcement

Lukáš Kadeřábek

KTM - 554

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jana Salačová, Ph.D.
Konzultant diplomové práce: Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.

Rozsah práce:

Počet stran:	81
Počet obrázků:	61
Počet tabulek:	23

V Liberci dne 14.5.2010

P r o h l á š e n í

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 14. 5. 2010

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji mojí konzultantce Ing. Janě Salačové, Ph.D. za skvělou spolupráci, vedení mojí DP a uvedení do problémů, který jsem se snažil prostudovat. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Miroslavě Maršálkové, Ph.D., která mi poskytla také řadu cenných rad i připomínek. Díky patří i Bc. Markétě Hovorkové za pomoc při výrobě kompozitních desek, katedře KTM za vytvoření vhodných podmínek pro vypracování DP a v neposlední řadě mým rodičům, kteří mě ve studiu na této fakultě podporovali.

Děkuji!

Lukáš Kadeřábek

Anotace

Tato práce se zabývá analýzou vnitřní struktury kompozitů s textilní, čedičovou výztuží. Analýza struktury je důležitá z hlediska zkoumání a hodnocení vnitřních imperfekcí. Imperfekce vznikají při výrobě kompozitu, a to v důsledku namáhání jednotlivých vrstev při kladení a dalších výrobních operacích. V neposledním kroku se práce zabývá výrobou kompozitních desek, ze kterých se vytvářely nábrusy, z nichž se vyhodnocovaly parametry struktury.

Annotation

This work is undertakes analysis of inner composite structure with textile, basalt underlay. Structure analysis is important from inner imperfection research point of view. Imperfections coming up during composite production due to layer straining and another manufacturing operation. In last but not least step is this work considering composite boards manufacturing, where setting of edges was done and where structure parameters were analysed.

Klíčová slova

Kompozit - Materiál, který jsou složen ze dvou nebo více složek, které se výrazně liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi.

Výztuha kompozitu - Plošný nebo objemový textilní útvar, zabezpečující vyztužení kompozitu.

Matrice - Spojitá část kompozitu, která významně ovlivňuje jeho výsledné vlastnosti. Vyplňuje prostor mezi vyztužujícími vlákny a přenáší na ně vnější namáhání.

Čedič - Tmavá, intruzivní, výlevná vyvřelá hornina, sklovité struktury.

Defekt - Vada, která vznikne v kompozitu již při jeho výrobě.

Obrazová analýza - Snímací zařízení, díky kterému můžeme defekty ve struktuře pozorovat a vyhodnocovat.

Key words

Composite - Material, compound of two or more components, which are different in physical and chemical properties.

Composite underlay - Surface or volume textile formation for textile underlay security.

Matrix - Connected part of composite, which is affecting final qualities. It's filling up space between stiffening fibres and it's transferring outer straining to it.

Basalt - Dark, irruptive, extrusive, eruptive rock of glassy structure.

Defect - Imperfection rised from the composite while manufacturing.

Image analysis - Scanning device, which helps us to observe and analyse defects in structure.

OBSAH

1 ÚVOD	10
1.1 Cíle DP	10
1.2 Současný stav řešené problematiky	11
1.3 Způsob řešení	15
2 REŠERŠNÍ ČÁST	16
2.1 Kompozitní materiály	16
2.2 Textilní kompozitní materiály	16
2.2.1 Výztuž	17
2.2.2 Matrice	21
2.3 Struktura kompozitu	26
2.3.1 Strukturní úrovně v kompozitu	26
2.3.2 Strukturní defekty	27
2.3.3 Klasifikace defektů ve struktuře kompozitu	28
2.4 Obrazová analýza	32
2.4.1 Počítačová reprezentace obrazu	33
2.4.2 Počítačová analýza obrazu	33
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
3.1 Výroba kompozitu	35
3.1.1 Příprava materiálu na kompozit	37
3.1.2 Výroba kompozitní desky	38
3.2 Tvorba příčného řezu	40
3.2.1 Příprava kompozitní desky	40
3.2.2 Příprava příčného řezu	41
3.2.3 Tvorba nábrusu	42
3.3 Snímání příčných nábrusů	44
3.3.1 Příprava příčných nábrusů ke snímání	46
3.3.2 Snímání příčných nábrusů	46
3.3.3 Imperfekce struktury	50
3.4 Zpracování obrazu	53
3.4.1 Segmentace objektů	53
3.4.2 Měření nasnímaných obrazů	55
3.4.3 Zpracování dat	56

4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	57
4.1 Výsledky měření	57
4.1.1 Matrice	57
4.1.2 Vzduchové bubliny	62
4.2 Vzájemné korelace jednotlivých parametrů	66
4.2.1 Matrice	67
4.2.2 Vzduchové bubliny	69
4.3 Podíl ploch jednotlivých složek v kompozitu	71
5 DISKUZE VÝSLEDKŮ	74
6 ZÁVĚR	76
7 ČÍSELNÝ SEZNAM	77
7.1 Obrázky	77
7.2 Tabulky	79
8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	80

1 ÚVOD

Kompozitní materiály jsou velkým přínosem a příslibem do budoucna a vyskytují se napříč celým průmyslovým odvětvím. Jejich prudký nárůst a hlavně vývoj nových materiálů je patrný.

Kompozity jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější složka – výztuž, a spojitá, obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže.

Tyto materiály poskytují v mnoha případech lepší vlastnosti jak mechanické, fyzikální i chemické. Cílem a úkolem je nahrazení klasických konstrukčních materiálů. Nesporná výhoda těchto materiálů je jejich hmotnost, která je v drtivé většině případů minimální, a to při stejných nebo dokonce výrazně lepších vlastnostech. Proto se kompozity v poslední době čím dál více používají a prosazují ve všech možných odvětvích průmyslu a zdokonalováním těchto materiálů dochází k jejich uplatnění i v oborech, kde to dříve nebylo příliš možné.

1.1 Cíle DP

Zajímavým faktem v této práci je kombinace tohoto typu materiálu – kompozitu a čediče. Materiálu, který se snaží rozšířit další používání kompozitů. Dalším spojením je také zde užívaná kombinace pleteniny a tkaniny, tedy kombinace vzájemně odlišných struktur, jejichž chování je naprosto odlišné. Proto je cílem diplomové práce přistoupit zodpovědně k zadanému tématu a pomocí fotodokumentace pečlivě zaznamenat i vyhodnotit defekty, které se vyskytly při výrobě těchto kompozitů.

K tomu bylo potřeba vytvořit nábrusy, které byly poté zkoumány pod zvětšením. Nábrusy byly vytvořeny z kompozitů, složených z textilních útvarů, jako je pletenina či tkanina. Zkoumala se také vzájemná přilnavost těchto dvou materiálů v jednom útvaru.

Po splnění tohoto úkolu bylo důležité obrazy nasnímat pomocí obrazové analýzy a zpracovat do výsledků, doplněných grafy. Ty by byly jasným závěrem, jenž vypovídá o struktuře těchto druhů kompozitů.

V důsledku toho, že tento typ kompozitu, tedy kombinace dvou textilních útvarů tkanina-pletenina, byl v minulosti velmi málo zkoumán, jedná se o zajímavý problém, při němž každá informace, která vyplyne z jeho řešení, je důležitá a cenná.

Z tohoto důvodu je tato práce začátkem a na tento problém se dají navazovat další zadání diplomových prací. Snad tato práce poslouží jako dobrý základ pro ostatní témata, týkající se čedičových kompozitů a kompozitů jako celku.

Shrnutí základních cílů DP

- výroba kompozitu
- vytvoření nábrusů z vyrobeného kompozitu
- nasnímání obrazů nábrusů pomocí obrazové analýzy NIS Elements
- detailní segmentace vad v nábrusech
- vyhodnocení pozorovaných kritérií
- názorné zpracování a interpretace výsledků

1.2 Současný stav řešené problematiky

Tato část seznamuje se současným stavem řešené problematiky a zaměřuje se hlavně na oblast pletených kompozitů.

Ve všech níže popisovaných pracích je patrné, jak je důležité studovat a rozebírat vnitřní strukturu takovýchto kompozitů. Jedním z důvodů je pochopení chování kompozitů při různých stupních a druzích zatížení, dále pak vhodnost různých druhů kompozitů k různým potřebám.

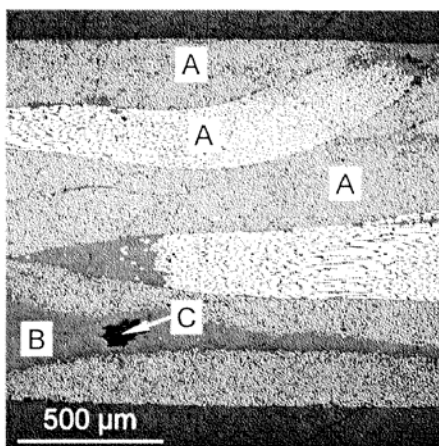
***Reber, R.: Mikro a makromechanické vlastnosti pletených kompozitů,
2001 [13]***

Autor se v této práci zabývá hlavně aspekty pro a proti použití pletených kompozitů a dále shrnuje jejich vlastnosti.

Lze konstatovat, že výzkum, a tudíž i znalosti říkají, že vliv pletených kompozitů se výrazně zvýšil v posledních deseti letech. Nicméně část kompozitních aplikací, ve kterých se v současné době používají, je stále malá. Důvody jsou různé. Úplety jsou

považovány za volné struktury, vhodné pro konstrukční aplikace. Navzdory skutečnosti, že jejich použitelné schopnosti se osvědčily, použití je stále malé. Dostatečný obsah vláken je u pletených kompozitů těžko dosažitelný. Tento společný problém byl rozebrán v mnoha studiích. Pomocí struktur pleteniny s nízkou plochou smyčky a kombinací několika pletených vrstev, lze obsah plochy vláken zvýšit o 50%. Je velké množství pletených struktur a kombinací vlákno - matrice, které lze použít u pletených kompozitů. I když je to hlavní výhodou, může to zkomplikovat také vytvoření komplexní databáze těchto materiálů. Rozsáhlá databáze je nevyhnutelný požadavek na zvýšení průmyslového využití textilních kompozitů.

Na druhou stranu se zájem o pletené kompozity stále zvyšuje. Mezi hlavní důvody tohoto zájmu patří to, že úplety jsou velmi pružné struktury. Jejich pružnost je vynikající v porovnání s jinými strukturami, např. tkaninami. Mohu se vytvářet složité struktury a vyztužení, i silné zakřivení. Pletené kompozity jsou koherentní, což znamená, že mají dobré mechanické vlastnosti po celé délce oblouku smyčky vlákna. Tato vlastnost je velmi výhodná v porovnání s krátkými vlákny. Pletenina má vysokou tažnost. Díky této vlastnosti může být nevhodná pro použití. Nicméně, anizotropie pozorované v těchto kompozitech jsou méně výrazné než například u tkanin. To je žádoucí aspekt v mnoha aplikacích. Díky otvorům v pletenině dochází k „zámkovému účinku“ pletených vrstev. Taková pletenina velmi zvyšuje vnitřní lomovou houževnatost. Velikost účinku závisí na velikosti smyčky. Náklady na výrobu jsou velmi důležité. Zátěžné pletení je proces s velkým objemem operací. Výrobní náklady jsou vyšší než u krátko vláknenných kompozitů, ale výrazně nižší než u 3D kompozitů a laminátů. Jak bylo uvedeno výše, téměř všechny kombinace vlákno - matrice jsou u pletených kompozitů možné. Jednoduché pleteniny v kombinaci s termoplastickými matricemi představují atraktivní výrobní možnosti. Navíc omezené snižování produkce odpadu nebo dokonce bezodpadové zpracování je u těchto kompozitů výhodou.



Obr. 1.2.1 Průřez pleteným kompozitem, kolmo na směr sloupků:

A) svazek uhlíkových vláken, B) matrice, C) volný prostor [13]

Různý jas vlákna je způsoben různými úhly vláken při leštění pomocí leštícího kotouče. U svazků bylo zjištěno, že jsou těsně semknuta, tj. pouze oddělena velmi tenkou vrstvou matrice.

Závěr z uvedené práce:

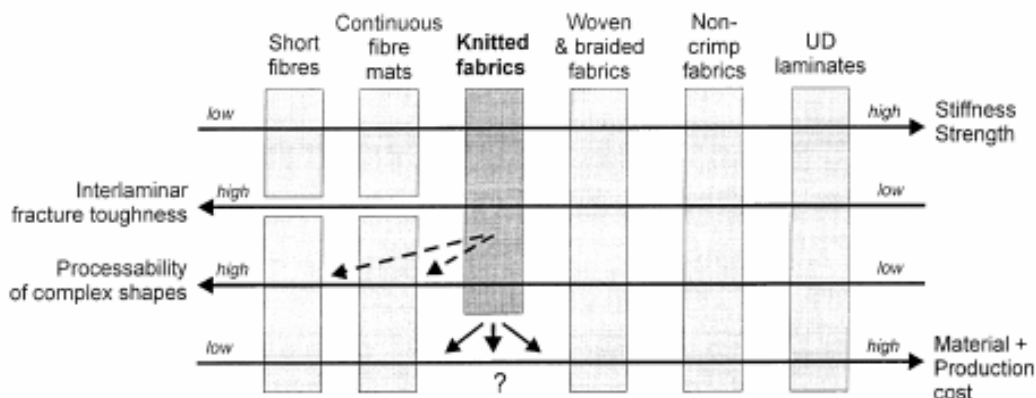
Zhutněné svazky nebyly pozorovány. Nejvyšší poměr tloušťky k šířce byl nalezen v krajních smyčkách, nejnižší pak ve středových proplétaných oblastech. U svazků vláken z povrchových vrstev bylo zjištěno, že jsou plošší a širší než svazky z vnitřních vrstev. To je důsledek přímého kontaktu s v průběhu spojení pod vlivem tlaku a teploty během lisování. Zkoumána vrstva odhalila rozšíření ve směru Z 1.05 mm, což bylo asi 40% z celkové tloušťky vzorku. Povrchová vrstva ukázala menší rozšíření ve směru Z, a to 0.69 mm, což odpovídá zhruba 20% z celkové tloušťky vzorku. Rozšíření smyčky bylo rovnoměrné s ohledem na tloušťku vzorku.

Gommers, B.; Verpoest, I.: Analýza pletených kompozitů, 2002 [14]

Autoři se zabývají orientací vláknenné výztuže, která se používá do kompozitů a vlastnostmi těchto výztuží.

Obrázek uvádí přehled některých vlastností výztuže pro kompozitní materiály, které jsou dnes k dispozici. V tomto případě se jedná o výztuže v pletených a tkaných

textiliích použitých kompozitů. Vlastnosti, které jsou srovnávány - tuhost a pevnost (příslušných kompozitů).



Obr 1.2.2 Přehled a porovnání vlastností výztuže [14]

Závěr z uvedené práce:

Tuhost a pevnost pletených kompozitů je vyšší než u vláknenných kompozitů, ale o něco nižší než u tkaninových kompozitů. Na druhou stranu, pleteniny mají obvykle jiné vlastnosti, než tkaniny, což může být žádoucí v mnoha aplikacích.

Savci, S.; Curiskis, J.: Studie deformace pleteniny pro pokročilé kompozitní struktury, 2005 [15]

Tento článek se zabývá hlavně deformačními vlastnostmi pletenin a přímo citovaný odstavec rozebírá tvárnost, kterou pleteniny disponují.

Pletenina má dobrý potenciál pro své mechanické vlastnosti, které mohou být přizpůsobeny díky různě pleteným vazbám. Tvárnost - výjimečná vlastnost, kterou mají zátažné pleteniny, umožňuje výrobu 3-D kompozitních struktur.

Závěr z uvedené práce:

Výsledky struktury ukázaly, že u jednotlivých oček lze dobře předpovědět tahové vlastnosti a simulovat „tváritelnost“. Je také nutné prověřit při „tváritelnosti“ dopady různých pletených struktur na deformaci útku. Dlouhodobé výsledky ukazují, že se tahové vlastnosti nemění a to bez ohledu na strukturu oka.

Fujihara, K.; Hamada, H.: Technologie výroby pletených kompozitů pro ortopedické kostní dlahy, 2001 [16]

Práce je soustředěna kolem oboru ortopedie a zabývá se testováním pletených kompozitů, které se používají jako kostní dlahy při různých poškozeních kostí.

Tento odstavec se zaměřuje na vlastnosti pletenin z uhlíku, které se používají pro ortopedické potřeby. Výdrž v ohybu u pleteného kompozitu byla zkoumána s ohledem na dva hlavní směry pletení. U pletených kompozitů byl rozptýl hodnot tuhosti ohybu poměrně velký. Nicméně, pletené kostní dlahy projevovali vyšší odolnost proti deformaci. V porovnání s dřívějšími kompozitními kostními dlahami, tyto pletené kompozitní kostní dlahy měli o 55-59% vyšší tuhost v ohybu, o 40-63% vyšší ohybový moment, a o 54-77% vyšší maximální ohybový moment.

Závěr z uvedené práce:

Z výsledků vyplývá, že pletené kompozitní desky s tloušťkou 3,2 mm jsou vhodné jako kostní dlahy a to hlavně pro oblast předloktí a pažní kosti.

1.3 Způsob řešení

Bylo třeba vyrobit kompozitní desku, navrstvením jednotlivých složek kompozitu (3.1). Z takto připravených kompozitních desek vyrobit příčné nábrusy pomocí Dentacrylu (3.2). Dalším z úkolů bylo tyto příčné nábrusy nasnímat pomocí NIS Elements (3.3) a takto nasnímané obrazy zpracovat (3.4). V tomto kroku se musely zpracovat zvlášť obrazy vzduchových bublin a zvlášť obrazy matrice. Následovalo měření parametrů objektů zájmu, tzn. plochy, ekvivalentního průměru, obvodu, max. průmětu, min. průmětu, max. průmětu 90 a kruhovitosti (kap. 4.1). Tyto parametry byly vyhodnoceny (4; 4.1; 4.2; 4.3).

2 REŠERŠNÍ ČÁST

2.1 Kompozitní materiály

Homogenní, čisté bezdefektní látky se vyskytují jen ojediněle. Z tohoto pohledu lze převážnou většinu materiálů a to jak přírodních, tak vyrobených člověkem, považovat za materiály složené, neboli kompozitní.

Pojem kompozit byl zaveden ve čtyřicátých letech a původně označoval složený materiál. V současnosti lze nalézt mnoho definic tohoto pojmu, ale základní představa je společná.

Jako kompozity se označují materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více složek, které se výrazně liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Tyto složky jsou navzájem rozlišitelné a oddělené rozhraním. [5]

Jedna nebo více fází jsou ponořeny ve fázi jiné. Jedna fáze, zpravidla houževnatá a plastická se nazývá matrice. Druhá, obvykle tvrdší a pevnější se nazývá výztuž. V místě přechodu obou fází vzniká tzv. fázové rozhraní, ve kterém dochází k jejich vzájemné interakci. Spojením těchto složek vznikne zcela nový materiál s unikátními vlastnostmi, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou samostatně, ani prostou sumací – SYNERGICKÝ EFEKT.

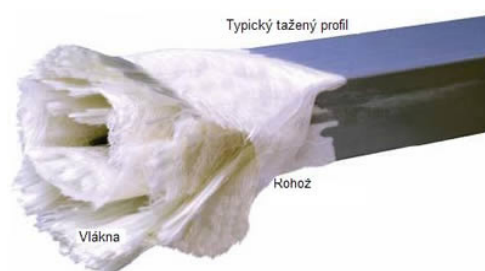
Při konstrukci kompozitu se vždy vychází z požadavku existence synergického efektu, který zajišťuje výslednému systému alespoň jednu lepší vlastnost, než je pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Složky svými vlastnostmi, geometrií, objemovým podílem, distribucí a vzájemnou interakcí silně ovlivňují vlastnosti celého kompozitu. [5]

2.2 Textilní kompozitní materiály

Významnými typy kompozitů jsou plasty vyztužené různými druhy vláken.

Principem vlastního vyztužení je skutečnost, že výztuž, mající vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem, se při vnějším namáhání deformuje více než polymer. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer, které v případě adheze mezi oběma komponentami umožňují přenos veškerého napětí z nepevné

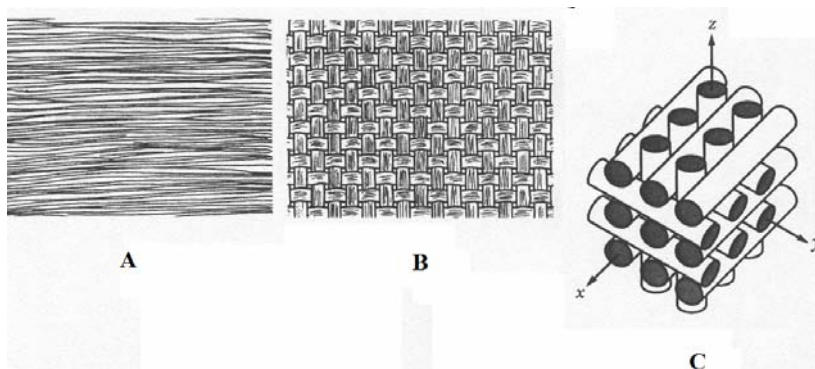
matrice do vláken. Ta jsou schopna nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže nepevné, ale deformovatelné pojivo je prakticky bez napětí. Použitím kompozitu místo tradičního materiálu, jako je například ocel, dochází k značnému snížení hmotnosti. To je dáno nízkou hmotností vlastního kompozitu, specifickými vlastnostmi jednotlivých složek a možností vytvořit kompozit přímo pro daný účel. Protože jde o kombinaci materiálů, můžou se kompozity navrhovat s ohledem na specifické vlastnosti, které přinášejí řadu výhod v porovnání s tradičními materiály, např. odolnost proti chemikáliím, elektrické a tepelně izolační vlastnosti atd. [1,25]



Obr.2.2.1 Příklad kompozitu s textilní výztuží [1]

2.2.1 Výztuž

K vyztužování textilních kompozitů se v poslední době, kromě jednosměrných – 1D výztuží ve formě paralelně uložených vláken, používá také plošných a objemových textilních útvarů, zabezpečujících vyztužení kompozitu ve dvou – 2D a třech směrech – 3D.



Obr. 2.2.2 Geometrie vlákenné výztuže – a, 1D výztuž

b, 2D výztuž

c, 3D výztuž [8]

Druhy nejčastější výztuže

Nejpoužívanějšími druhy jsou:

Skleněná vlákna

Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů a dloužením. Mají izotropní vlastnosti a vysokou pevnost při nízkém průměru. Podléhají statické únavě, vlhkem klesá jejich pevnost a jsou elektricky nevodivá.

Keramická vlákna

Vyrábějí se metodou CVD (kondenzace plynu na vlákenný substrát) nebo zvláknováním koncentrovaného roztoku. Mají vysokou tepelnou a chemickou odolnost, elektricky nevodivá.

Bórová vlákna

Vyrábějí se metodou CVD. Mají vysokou pevnost, pružnost, stálost proti tlaku.

Uhlíková vlákna

Vyrábějí se pyrolýzou polymerních prekurzorů (výchozích látek netavitelných termosetů) z PAN, ze smol (odpad po destilaci uhlí a ropy), nebo růstem na substrátu. Jsou velmi křehká, mají malé prodloužení při přetrhu (rozměrová stálost). Jsou elektricky vodivá, malá absorpce RTG záření.

Polymerní vlákna

Vyrábějí se dloužením z taveniny polymerů. Mají malou hustotu, vysokou pevnost, vysokou tuhost a elektrickou nevodivost.

Kovová vlákna

Vyrábějí se nařezáním nití z měděných, hliníkových, ocelových a bronzových destiček. Někdy se dále melou na krátká vlákna, jsou elektricky vodivá.

Přírodní vlákna

Např. azbestová, z konopí, juty, lnu, bavlny,...

Čedičová vlákna

Mají dobré izolační vlastnosti tepelné, elektrické i zvukové. Jsou odolné v širokém teplotním intervalu, levnější než skleněná a chemicky odolnější.

DP je zaměřena právě na čedičová vlákna.

2.2.1.1 Čedič

Čediče jsou tmavé, intruzivní, výlevné vyvřelé horniny, porfyrické nebo sklovité struktury. Odličnost je obvykle sloupcovitá. Textura bývá proudovitá nebo všesměrná. Zrnitost je jemná, barva šedo-černá až černá. Zvětralý má barvu spíše šedou. Tato hornina tvoří z velké části zemskou kůru a je nejhojnější magmatická složka zemského povrchu. Tvoří části dna oceánů, plošinové kontinentální čediče.

Ve 20. století slévárny z čediče produkují např. dlažby, žlaby nebo třeba otěruvzdorná potrubí, která se nejčastěji používají pro pneumatickou nebo hydraulickou dopravu abrazivních materiálů. Dlažby se používají i pro odolné průmyslové podlahy. Žlaby, cihly a trouby jsou pro své vlastnosti používány i pro kanalizace.

Jsou to neovulkanické bazické výlevné (efuzivní) horniny tvořené dvěma základními horninotvornými minerály – bazickým plagioklasem o bazicitě $An > 50$ (labradorit, vzácněji anortit) a monoklinickým pyroxenem (augit, titanový augit). Z dalších minerálů může být přítomen olivín, případně rombický pyroxen, amfibol nebo biotit. Olivín zpravidla tvoří vyrostlice (fenokrysty) v jemnozrnné základní hmotě horniny, které mohou činit technologické problémy při tavení horniny. Z rudních minerálů bývá hojně zastoupen magnetit (až 10 – 15 %, ojediněle 20 %), titanomagnetit nebo ilmenit. V závislosti na rychlosti tuhnutí lávy mohou čediče obsahovat také vulkanické sklo. Z hlediska chemismu jsou bazalty tvořeny především SiO_2 (44 – 52 %), dále jsou významně zastoupeny Al_2O_3 (13 – 17 %), CaO, MgO a oxidy Fe (FeO a Fe_2O_3). [16]



Obr. 2.2.3 Typická podoba horniny - „Čedičové varhany“ [16]

2.2.1.2 Čedič jako textilní útvar

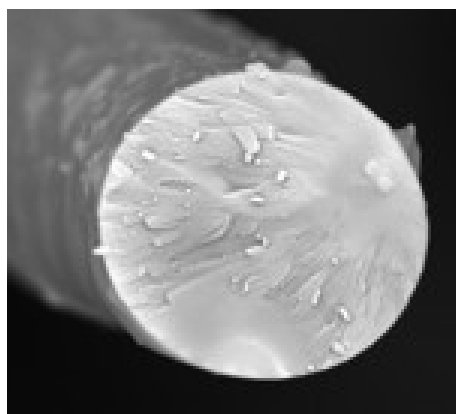
Čedičová tavenina se také dá rozvláknit, vznikají tak vlákna vysoce pevná a ohebná. Vlákna předčí svými fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi vlákna skleněná i azbestová. Tkaniny z čedičových vláken se dají použít ve stavebnictví, v leteckém průmyslu, k výrobě tepelných, zvukových a chemických izolací atd. Tato vlákna jsou zpracovávána při výrobě vysokopevnostních, tepelně odolných Hi-Tech šňůr a sítí. [17]

Výroba

Technologie výroby čedičových přízí je podobná výrobě skelných vláken. Čedič se zvlákňuje ve zvlákňovací peci při teplotách kolem 1300 °C. Pro výrobu kontinuálních vláken nesmí teplota tavení přesáhnout limit 1250 °C. Technologie, jíž se čedičová vlákna získávají z taveniny, jsou centrifugální vyfukování, multirolování a vyfukování při tuhnutí. [17]

Vlastnosti

Příze získané z čediče mají vysokou voděodolnost (90,0 - 99,9 %), teplotní odolnost (650 - 800°C) lišící se dle druhu kamene, z něhož je vytaven. Mrazuvzdornost pak čedič vykazuje až do teploty -260 °C. Čedič je také velmi málo hygroskopický (< 0,1% při 65 % vlhkosti v ovzduší). Je vysoce chemicky stabilní a chová se neutrálně jak v kyselém tak zásaditém prostředí. Surovina pro výrobu čedičových vláken je jedna z nejlevnějších a nejdostupnějších v přírodě. Čedičové vlákno je velmi křehké a má tendenci při manipulaci uvolňovat jehličky, jež se zarývají do kůže. Podle WHO (světová zdravotnická organizace) riziko rakoviny vzniká při práci s keramickými vlákny průměru pod 3 µm, délky nad 5 µm a poměru délky ku průměru větší než 5:1. Částice čediče jsou naštěstí příliš tlusté, než aby je bylo možno vdechnout, nicméně pracovat s čedičem se musí obezřetně. Hmotnost jednotlivé částice se pohybuje kolem 65 ng. [17]



Obr. 2.2.4 Obrázek čedičového vlákna v lomu [17]



Obr. 2.2.5 Čedičový roving [26]

2.2.2 Matrice

Matrice je spojitá část kompozitu a významně ovlivňuje jeho výsledné vlastnosti. Vyplňuje prostor mezi vyztuzujícími vlákny a přenáší na ně, prostřednictvím konců a válcového povrchu výztuže, vnější namáhání. Velmi důležitým předpokladem pro výrobu kompozitů je adheze povrchů matrice a výztuže. [22,23]

Základní druhy matric:

- polymerní;
- skleněná;
- kovová;
- sklokeramická;
- keramická;
- uhlíková. [7]

Pro řešený typ kompozitu byla použita **polymerní matrice**.

Polymerní matrice:Reaktoplastické (termosety)

- nenasycené polyesterové;
- vinylesterové ;
- epoxidové;
- fenolické. [7]

Termoplastické

- polypropylenové;
- polyamidové;
- polyamidové. [21]

Pro řešený typ kompozitu byla použita **polymerní, reaktoplastická matrice**.

Polymerní, reaktoplastické matrice:**Polyestery**

Nenasycené polyestery jsou nejčastěji používanou matricí pro vyztužené plasty zvláště v kombinaci se skelnou výztuží. Polyesterové pryskyřice mají dobré mechanické, elektrické a chemické vlastnosti. Polyestery jsou dobré do slabě kyselého prostředí.

Methyl – methakryláty

Modifikované methyl-methakrylátové pryskyřice mají vynikající vlastnosti a jsou nejčastěji používány v kombinaci s vysoce kvalitní výztuží, jako jsou karbonová vlákna. Tyto pryskyřice je možné naplnit retardéry hoření, čímž přináší vynikající řešení pro aplikace, kde je požadována ohnivzdornost výrobku.

Epoxidy

Epoxidy mají vynikající mechanické a elektrické vlastnosti a jsou běžně používány s kvalitními výztužemi např. s uhlíkovými nebo skelnými vlákny, pokud je podíl výztuže velmi vysoký. Mají dobré elektroizolační vlastnosti v široké oblasti teplot, cenná je i jejich značná odolnost proti vodě, roztokům alkálií i kyselin a některým rozpouštědlům.

Epoxidové pryskyřice vyztužené čedičovými vlákny zaujímají významné místo mezi kompozitními materiály. Matrice je v těchto materiálech tvořena epoxidovou pryskyřicí, která rozvádí mechanická namáhání rovnoměrně na všechna vlákna výztuže, chrání je před mechanickým poškozením a chemickými vlivy. Kompozity s matricí z epoxidové pryskyřice mají v porovnání s jinými, běžnými materiály velmi příznivou pevnost v tahu a dobrou odolnost vůči únavovému namáhání. K dalším přednostem epoxidových pryskyřic patří dobrá odolnost vůči působení chemikálií a zvýšeným teplotám, výborná adheze k vyztužujícímu materiálu, dobré elektrické a mechanické vlastnosti, ale i malé smrštění při vytvrzování. [21]

Vinylestery

Vinylesterové pryskyřice kombinují nejlepší charakteristiky polyesterových a epoxidových pryskyřic. Vinylestery mají dobrou odolnost v kyselém i alkalickém prostředí, zvláště ve vysokých teplotách. Selným vláknem vyztužené vinylesterové profily mají dobrou elektrickou a tepelnou izolaci. Na epoxidech založené vinylesterové pryskyřice mají dobrou chemickou odolnost ve zvýšených teplotách. [5]

Pro řešený typ kompozitu byla použita **polymerní, reaktoplastická, epoxidová matrice.**

Jako nejideálnější se v tomto případě jevílo použít matrici s obchodním označením **Lukosil M 130**. A to kvůli jeho snadnému zpracování i při pokojových teplotách a k tomu úměrně dobrým vlastnostem.

2.2.2.1 Metylsilikonový lak Lukosil M 130

Silikonové laky se dělí na dvě skupiny, a to na metylsilikonové a metylfenylsilikonové.

Methylsilikonový lak Lukosil M 130 představuje moderní typ za pokojové teploty zasychajícího silikonového laku a je špičkovým výrobkem ve své kategorii. Je to roztok silikonové pryskyřice v xylenu jako rozpouštědle. Při pokojové teplotě vytváří nelepivý, pružný a mechanicky poměrně odolný film. Tepelným vytvrzením se dosáhne zvýšení jeho tvrdosti, mechanické a chemické odolnosti a stabilizuje se pro trvalé tepelné namáhání. Silikonové laky tvoří velkou skupinu silikonových výrobků, které jsou dodávány k použití ve formě roztoků v organických rozpouštědlech. Po nanesení a vytvrzení vykazují řadu vynikajících vlastností. [18]

Vlastnosti:

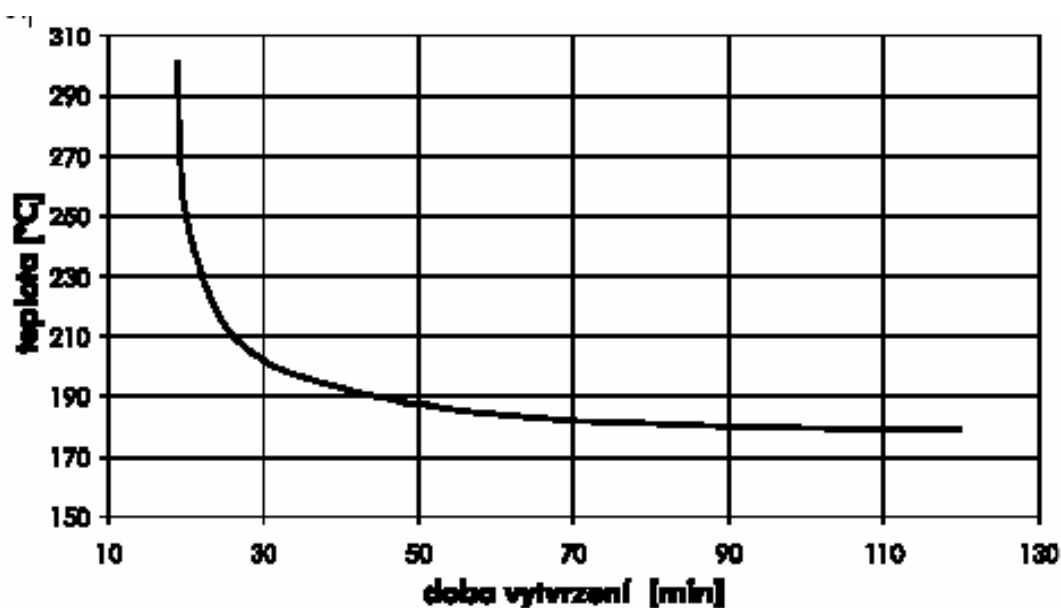
- odolnost ve velkém rozsahu teplot;
- hydrofobní vlastnosti;
- separační vlastnosti filmů (plastické hmoty, potraviny);
- odolnost proti povětrnostním vlivům a UV záření;
- možnost modifikace organických pryskyřic. [18]

Parametry:

Tab. 1: Důležité parametry Lukosilu M130

Obsah netěkavých složek [%]	50±2
Měrná hmotnost [kg/m ³]	1000 - 1020
Viskozita při 20°C [mPa.s]	30 - 40
Konzistence při 23°C	24 - 51
Číslo kyselosti [mg KOH/g]	0,02
Třída hořlavosti	2
Doba schnutí [hod]	max. 8

Lukosil M130 je možné vytvrdit teplotou bez použití katalyzátoru, a to při dodržení podmínek, které jsou znázorněny v grafu.



Obr. 2.2.6 Doba vytvrzení kompozitu v závislosti na teplotě – Graf znázorňuje závislost doby vytvrzení na teplotě, která je zvolena podle druhu kompozitu.[18]

Použití:

Hlavní použití Lukosilu M 130 je jako pojivo pro výrobu tepelně odolných nátěrových hmot s použitím do 350 °C. Pro svoje výborné separační vlastnosti je možno ho použít jako mechanicky odolný separační nátěr forem pro odlévání a lisování pryskyřic, plastických hmot a kaučuků. Pro tyto účely je třeba nátěr tepelně vytvrdit a není nutno použít katalyzátor. Další využití je jako pojivo elektroizolačních a tepelně odolných směsí při výrobě elektroizolačních desek. Používá se rovněž jako ochranný nátěr desek tištěných spojů. [18]

2.3 Struktura kompozitu

2.3.1 Strukturní úrovně v kompozitu

Z hlediska struktury je velmi důležité dodržovat posloupnost kompozit – textilní vrstva – vlákenný svazek – vlákno, viz Tab. 2. Toto je důležité pro odvození výsledných vlastností a to hlavně při zkoumání vlivu mikroskopické odezvy jednotlivých prvků na makroskopickou odezvu celého kompozitu. [12]

V této práci byly studovány hlavně strukturní prvky na makro úrovni.

Tab. 2: Posloupnost strukturních úrovní

Úroveň	Objekt	Rozměr
Makro úroveň	Kompozit (složen z textilních vrstev)	Jednotky až desítky mm
Mezo úroveň	Textilní vrstva (např. tkanina, pletenina)	Jednotky až desítky mm
Mikro úroveň I	Vlákenný svazek	Jednotky mm
Mikro úroveň II	Vlákno	Tisíciny až desetiny mm

Všeobecně platí, že při popsání struktury se hledí na to, jak moc přesné informace jsou potřeba. Z těchto důvodů jsou používány tyto pohledy na strukturu:

- ideální struktura;
- reálná struktura;
- virtuální struktura. [12]

Ideální struktura

Ideální struktura opomíjí základní zákonitosti reálné struktury a nebere v úvahu mnoho vlivů. Ve většině případů se tedy jedná o teoretický model a její popis nemusí být tedy založen na případech z praxe. Její největší výhodou je jednoduchost a díky vyloučení nahodilé složky i její přesná periodicita. Používá se jako základ při vytváření jednoduchých modelů - např. při odhadování vlastností zkoumaného materiálu.

Reálná struktura

Reálná struktura je získána experimentálním pozorováním – většinou v podobě obrázků nasnímaných řezů. Tím pádem obsahuje nahodilou složku a to brání její periodicitě. Nevýhodou je, že se u každého nasnímaného řezu liší a navíc neobsahuje všechny potřebné informace – např. prostorovou strukturu. I přes tuto nevýhodu je ale v popisu reálná struktura na vyšší úrovni, než ideální a podává přesnější informace o zkoumané struktuře vzorku.

Virtuální struktura

Pomocí generátorů nahodilých čísel je možné generovat více řezů, které by měly být stejné jako původní. V tom případě se jedná o „generování virtuální struktury“, pomocí něhož lze utvářet modely blízké reálné struktuře. Virtuální vlákenný svazek je získán pomocí statistiky z velkého množství nasnímaných řezů. Poté je možno generovat náhodné řezy, které jsou stejné jako řezy reálné. Při odstranění náhodné složky je možno generovat i ideální vlákenný svazek odvozený z experimentů. [12]

2.3.2 Strukturní defekty

Při výrobě kompozitů dochází vlivem fyzikálních, mechanických i chemických sil ke vzniku defektů a imperfekcím struktury. Procesy, při kterých strukturní defekty vznikají, jsou popsány níže.

Laminace – Nevhodná impregnace, nečistoty na povrchu vláken, nízká povrchová energie vláken, geometrické uspořádání vláken, pryskyřice při prosycování proniká rychlejší většími póry, nejtěsnější póry ve vlákenných svazcích mohou zůstat neprosyceny

Vytvrzování – Při nedostatečném vytvrzování se v dalším procesu uvolňují ve větším množství těkavé zplodiny rozpouštědla, které rozevírají póry. Do prostoru mezi vlákny, kam nezatekla pryskyřice, pronikají těkavé složky rozpouštědel, které když osáhnou bodu varu mnohonásobně zvětší svůj objem.

Pyrolýza – Změny objemu při pyrolýze matrice. Nestejnoměrné rozložení matrice má za důsledek různé objemy rozkládaných produktů.

Po pyrolýze – Rozdíly v dilataci vláken a matrice. Anizotropie dilatace vláken. [19]

2.3.3 Klasifikace defektů ve struktuře kompozitu

Strukturní defekty můžeme klasifikovat podle různých hledisek, např. podle:

- mechanismu vzniku;
- místa výskytu;
- vlivu na mechanické vlastnosti;
- orientace;
- velikosti. [2]

Třídění podle místa výskytu a vlivu na mechanické vlastnosti se do jisté míry prolíná.

Typy strukturních defektů dle způsobu vzniku

Nežádoucím důsledkem fyzikálně-chemických procesů probíhajícím při přípravě čedičových kompozitů je výskyt strukturních defektů – pórů a trhlin, a to jak uvnitř vláknenného svazku, tak i v matrici, velmi složitá je rovněž oblast rozhraní.

Hlavní typy makroporézních defektů tvoří trhliny vzniklé srážením matrice, trhliny vzniklé tepelně-tlakovým působením a bublinové póry. Tyto defekty jsou nevyhnutelnými důsledky tepelného zpracování při výrobě kompozitů. [1]

Bublinové póry

Bublinové póry jsou typické pro matrice ze smol, ale ani v kompozitech s matricí z pryskyřic není jejich výskyt zvláštností. V tomto případě jsou způsobeny sekundární reakcí mezi plyny uvolňovanými při vytvrzování. [1]

Jsou to zpravidla tyčinkovité dutiny, jejichž délka výrazně převyšuje zbývající dva rozměry. [2] Jejich kruhový až oválný příčný průřez má velikost řádově několika průměrů vláken. [6] Hlavní podíl na jejich vzniku má únik těkavých složek při procesu vytvrzování, menší pak nedokonalé smočení vláken v matrici.

Dělení pórů dle velikosti:

Tab. 3: Velikosti pórů [4]

Typ póru	Velikost poloměru póru [nm]
Mikropór	$r < 1,6$
Mezopór	$1,6 < r < 35$
Makropór	$35 < r < 7500$
Hrubý pór	$r > 7500$



Obr. 2.3.1 Bublinový pór v kompozitu

Trhliny

Rozměrové změny, ke kterým dochází u výztuže i matrice během výroby kompozitu, mohou mít za příčinu vznik trhlin. Při zahřívání kompozitu během výroby, probíhají v jeho struktuře tepelně-rozměrové změny. Trhliny jsou destičkové dutiny, jejichž tloušťka je oproti zbývajícím dvěma rozměrům zanedbatelná a může dosáhnout poloviny tloušťky textilní vrstvy. V příčném řezu kompozitní strukturou se jeví jako délkový útvar, mající řádově šířku desítek průměrů vlákna. [6] Jejich výskyt je důsledkem objemových změn při vytvrzování matrice a při chladnutí kompozitu. [6] V průběhu zahřívání ztrácí matrice původní hodnoty objemu. Pokud je srážení omezováno okolní vlákenou výztuží dochází k iniciaci trhlin v nově vznikající matici a jejím okolí.

Trhliny mohou být tvořeny také působením tlaku a tepla, vzniklým anizotropií tepelné expanze a rozdíly mezi tepelnou expanzí uvnitř vlákeného svazku a tepelnou expanzí v matici. [6]

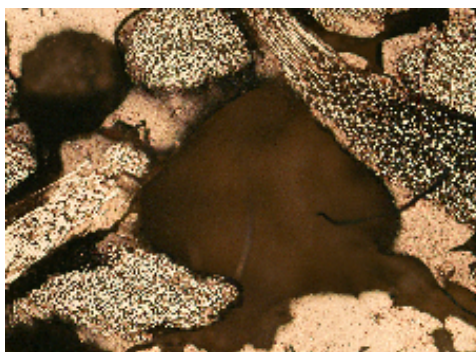


Obr. 2.3.2 Trhlina v kompozitu

Prázdná místa (dutiny)

Nedokonalé prosycení vrstev tkaniny pryskyřicí, může způsobit výskyt dutin uvnitř kompozitu. Jejich tvar může být rozličný, od bublinových pórů až po trhliny a závisí na typu kompozitu a způsobu jejich výroby.

Na rozdíl od ostatních druhů strukturních defektů zaznamenaných ve struktuře, lze výskyt prázdných míst významně ovlivnit způsobem výroby kompozitu. [1]



Obr. 2.3.3 Dutina v kompozitu

Typy strukturních defektů dle místa jejich výskytu

Podle místa výskytu, lze strukturní defekty rozřadit na trhliny:

- mezi vrstvami;
- mezi svazky ve vrstvě;
 - mezi svazky téhož systému;
 - mezi svazky obou navzájem kolmých systémů;
- mezi vlákny ve svazku;
- dutiny ve vazném bodě, vzniklé nedostatečným prosycením výztuže matricí, jejich počet závisí na typu vazby, více možností je u plátnové vazby;
- defekty v matrici. [6]

Defekty uvnitř vlákenného svazku

Pro oblast uvnitř vlákenného svazku jsou typické *bublinové póry*, které jsou uvnitř multifilu rozmístěny víceméně rovnoměrně. Další vadou typickou pro oblast uvnitř vlákenného svazku jsou *trhliny napříč svazkem*, tyto jsou orientovány přibližně kolmo na osu svazku a protínají část, ve velkém množství případů, však celý vlákenný svazek a tím jej v podstatě rozdělují na samostatné části. [20]

Fakt, že tyto trhliny jsou orientovány kolmo na osu vlákenného svazku je, mimo jiné zapříčiněn rozdílnou dilatací multifilu v příčném a podélném směru. Zatímco v příčném směru se vlákna dilatují řádově stejně jako matrice, v podélném směru je jejich dilatace mnohem větší, tím dochází k iniciaci trhlín. Trhliny napříč vlákenným svazkem tedy vznikají až během pyrolýzy. [6]

Defekty mezi vlákennými svazky

Ve vazných bodech textilie, tj. v místě dotyku osnovního a útkového svazku tkaniny, lze velmi často zaznamenat výskyt tzv. *delaminačních trhlín*, které od sebe oddělují jednotlivé vlákenné svazky, znemožňují jejich vzájemnou interakci při přenosu zatížení a tím významně ovlivňují mechanické vlastnosti celého kompozitu. [6]

Tyto trhliny jsou iniciovány již během procesu laminace, resp. impregnace, nedostatečným prosycením výztuže maticí, a to především v okolí vazných bodů. [20]

Defekty v matici kompozitu

V matici kompozitu se vyskytují dva základní defekty:

- velké kapsy nevyztužené matrice mezi vrstvami textilie i mezi vlákennými svazky;
- defekty v matici uvnitř vlákenného svazku. [6]

Typy strukturních defektů podle vlivu na mechanické vlastnosti kompozitu

Podle vlivu na mechanické vlastnosti kompozitu jsou trhliny děleny na:

- Mikromechanické – v rozsahu velikosti průměru vlákna, tj. uvnitř vlákenného svazku, viditelné při velkém zvětšení.

Jsou to trhliny: - mezi vlákny

- v matici uvnitř vlákenného svazku.

Ovlivňují přenos mechanického zatížení z vlákna na vlákno.

- Minimechanické – v rozsahu velikosti tloušťky textilní vrstvy, tj. průměru multifilního svazku, pozorovatelné při menším zvětšení.

Jsou to trhliny: - mezi vlákennými svazky;

- mezi textilními vrstvami;

- matici mezi vlákennými svazky, vrstvami.

Ovlivňují přenos zatížení mezi vlákennými svazky a vrstvami laminátu. [2,6]

Typy strukturních defektů podle orientace

Stejně významná je klasifikace trhlin z hlediska jejich orientace vůči textilní vrstvě kompozitu:

- Trhliny rovnoběžné s textilní vrstvou
 - mezi textilními vrstvami;
 - mezi vlákennými svazky obou systémů.

Mají rozhodující vliv na smykovou vrstvu kompozitu.

- Trhliny kolmé k textilní vrstvě
 - mezi svazky téhož systému;
 - uvnitř vlákenného svazku.

Ovlivňují hodnotu ohybové pevnosti. [2,6]

Typy strukturních defektů podle velikosti

Trhliny a póry se velikostí liší o jeden až několik řádů [6], což závisí také na tom, zda se vyskytují v 1D, nebo 2D kompozitu.

U 2D kompozitů lze vlákenné póry a trhliny rozlišit dle velikosti jejich příčného řezu. [6,24] Za mezivlákenné póry považujeme dutiny, jejichž plocha je menší než $50 \mu\text{m}^2$, zatímco mezivlákenné trhliny uvnitř svazku mají plochu $50\text{--}150 \mu\text{m}^2$.

Tab. 4: Plošný rozdíl mezi defekty

Typ defektu	Velikost plochy [μm^2]
Mezivlákenný pór	< 50
Mazivlákenná trhlina	50 - 150

2.4 Obrazová analýza

Metody počítačového zpracování a analýzy obrazu bylo zpočátku využíváno v robotice, při dálkovém průzkumu Země pro zpracování leteckých a družicových snímků pro účely kartografie, ekologie a vojenství. Odtud se tato metoda rozšířila do dalších oborů a v současné době je typickým interdisciplinárním oborem.

Analýza obrazu se zabývá takovými obrazy, které mají nějaký vztah ke struktuře hmoty, zobrazovací techniky nejsou omezeny jen na světelnou mikroskopii. Je možné

analyzovat obrazy získané v jiných oblastech spektra, elektronovou mikroskopií, rentgenograficky nebo tomograficky.[3]

Obrazová analýza poskytuje reprezentativní, reprodukovatelná data, která jsou pro studovanou strukturu typická a mají význam pro daný obor.

2.4.1 Počítačová reprezentace obrazu

Obrazová data jsou rozčleněna plošným rastrem na jednotlivé obrazové elementy - pixely. Každý pixel je reprezentován číslem, které představuje kvantovou intenzitu - stupeň šedosti.

Celý obraz tedy tvoří obrazovou matici čísel P (sloupců) * Q (řádků), kde každému obrazovému elementu je přiřazena hodnota z intervalu $<0,1>$. Pokud každý obrazový element nabývá hodnoty 0 nebo 1, pak hovoříme o binárním obrazu.

Barevný obraz se skládá ze tří složek, tj. tří šedých obrazů:

- červené – RED;
- zelené – GREEN;
- modré – BLUE.

Jako celek je nazýván RGB obrazem.

2.4.2 Počítačová analýza obrazu

Analýza obrazu se sestává z důležitých prvků:

Snímání a převedení do číslicové formy je v podstatě obrazovou analýzou v užším slova smyslu a jsou pro ni typické *transformace* obrazu, identifikace objektů - *segmentace* a kvantifikace do omezeného množství čísel – *měření*. [3]

Snímání obrazu

Je-li barevný obraz snímán černo-bílou kamerou, je nutné brát v úvahu spektrální charakteristiku kamery a barvu polarizačního světla. Při použití dobrých světelných filtrů a barevných preparátů pak snímání černobílou kamerou zcela vyhovuje. [11]

Transformace obrazu

Transformace obraz vyhlazují, zaplňují světlé a tmavé ostrůvky. Souvislé homogenní plochy zůstávají beze změny. [11]

Změna obrazu pomocí:

- Zvýšení kontrastu – Všechny obrazové elementy, mající hodnoty šedi menší nebo rovny f_{\min} budou změněny na nulu, všechny hodnoty šedi větší nebo rovny f_{\max} budou změněny na 255.
- Prahování – Převádění obrazu na černobílý segmentovaný (binární) obraz, kde pixely s hodnotami 0 tvoří pozadí a pixely s hodnotami 1 tvoří objekty.
- Eroze - Definována pomocí masky, jeden bod této masky je počátkem její souřadnicové soustavy. Postupně se ztotožňuje se všemi body obrazu a takto určená maska je strukturním elementem, který se systematicky posouvá obrazem a z překrytých obrazových elementů se vždy vyhledá minimální hodnota.
- Dilatace - Definována obdobně jako eroze. Vyhledává se maximální hodnota na okolí definovaném strukturním elementem.

Segmentace obrazu

Segmentací se obrazové pole rozdělí na více fází, v jednodušším případě se jedná o pozadí a objekty, které mají být analyzovány. Segmentace je tedy speciální transformace, která převede původní obraz na obraz binární. Segmentace se provádí *prahováním*. [3]

Měření obrazu

Jsou dva přístupy k měření. První reprezentuje obraz jako funkci – *densitometrie*, a druhý jako bodovou množinu – *morfologie*.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

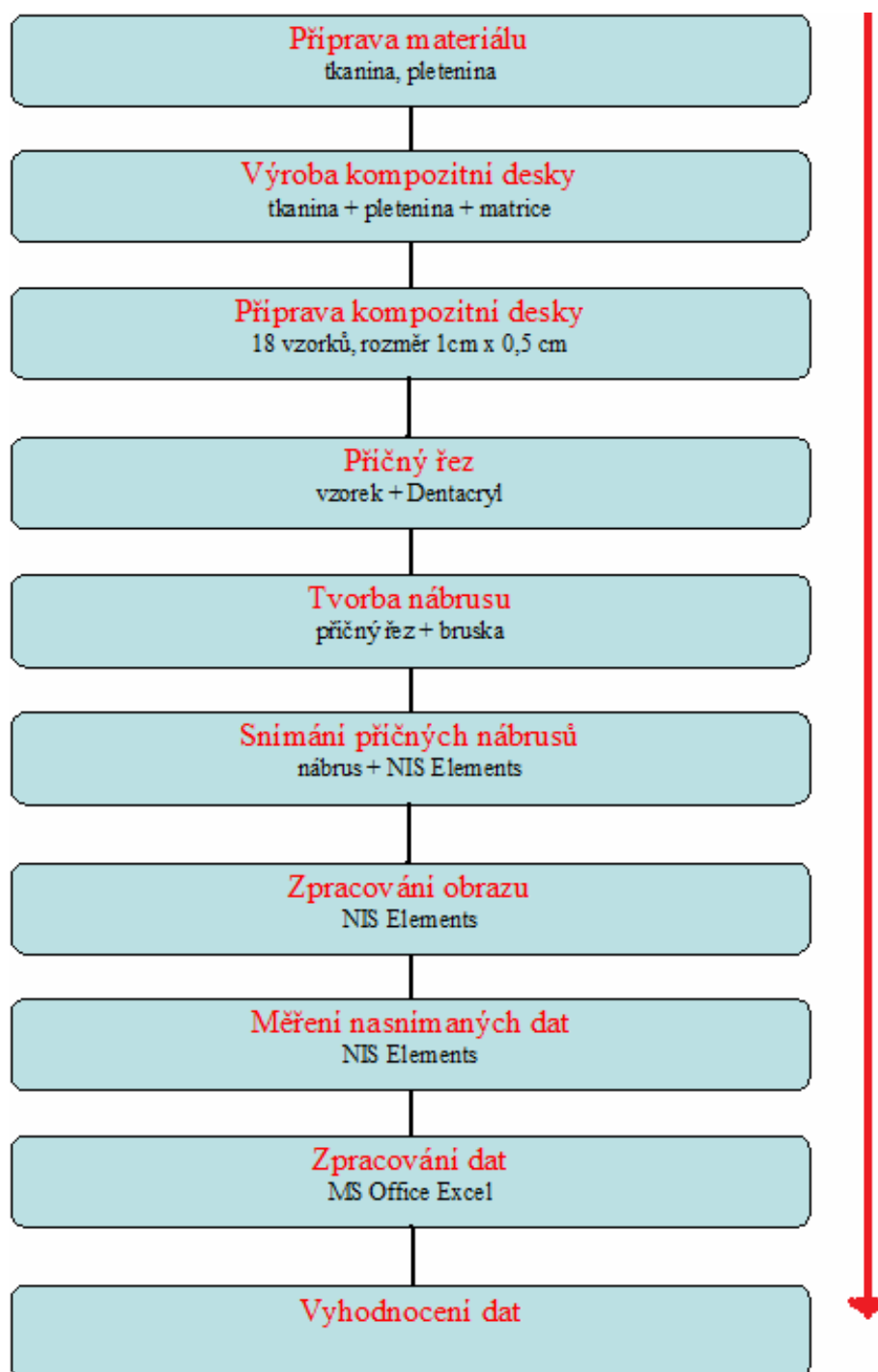
V experimentální části byly vyrobeny kompozitní desky a z nich příčné nábrusy. U těchto nábrusů byly nasnímány potřebné parametry a ty vyhodnoceny do výsledků, doplněných grafy.

3.1 Výroba kompozitu

Výroba kompozitů probíhala v laboratořích KTM za spolupráce dvou osob. Kompozit se vyráběl vrstvením příslušných výztuží a byl průběžně sycen matricí. Detailnější postup je uveden na Obr 3.1.1 na následující straně.

Použité přístroje a nástroje

- lisovací plechy (Obr. 3.1.6);
- vytvrzovací pec zn. HS 122A (Obr. 3.1.7);
- kotoučová pila zn. (Obr. 3.2.1);
- diamantová pilka (Obr. 3.2.2);
- svěrák (Obr. 3.2.2).



Obr. 3.1.1 Postup výroby kompozitu

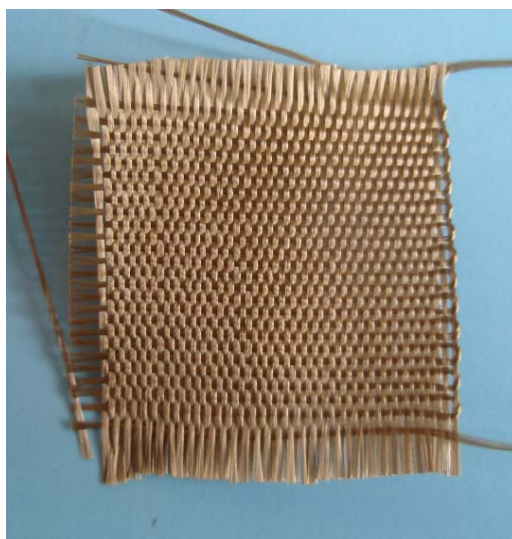
3.1.1 Příprava materiálu na kompozit

Pro účely pozorování v této práci byly vyrobeny tři druhy kompozitů, které byly složeny z vrstev **tkaniny** a **pleteniny**. Jednalo se o různé kombinace těchto textilních útvarů. Přesné složení a struktura obou útvarů jsou podrobně popsány v práci níže.

Tkanina

Jedná se o tkaninu ve formě rovingu, která je tkána v plátnové vazbě 1:1, materiálem je čedič, jemnost příze 1000 dtex, dostava osnovy 160 nití/100 mm, dostava útku

70 nití/100 mm, tloušťka tkaniny je 0,286 mm a plošná hmotnost tkaniny 0,270 kg/m².



Obr. 3.1.2 Čedičová tkanina, vazba plátno 1:1

Tkanina, potřebná k výrobě kompozitu byla vyrobena ruskou firmou „Kamenyj věk“. Prvním úkolem bylo rozstříhat tkaninu na čtverce o požadovaném rozměru 21 x 21 cm.

Zde se hned objevil problém s rozdělením tkaniny. Čedičová vlákna jsou poměrně velmi pevná, ale mají nízkou hodnotu vzájemného tření ve vazbě, a tak docházelo k různému deformování vazby. Bylo potřeba tuto operaci provádět velice opatrně.

Pletenina

Pletenina je pletena opět z čediče. Hustota sloupků je 40/100mm a hustota řádků je 50/100mm. Jedná se o zátažnou oboulícni pleteninu.



Obr. 3.1.3 Pletenina použitá v kompozitu

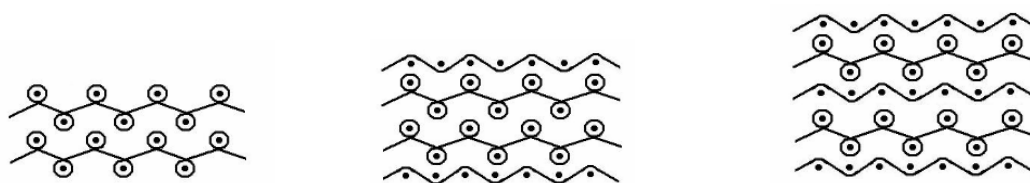
Pletenina, použitá na výrobu, byla vyrobena na vlastním pletacím stroji na KTM. Tato pletenina již byla připravena a upletena v požadovaném rozměru 21 x 21 cm.

3.1.2 Výroba kompozitní desky

Výroba kompozitní desky proběhla konvenčním způsobem – ruční kladení prepregovou technologií. Kladení vrstev bylo:

- 1. vzorek: **pletenina – pletenina**
 - po řádcích (označení 1);
 - po sloupcích (označení 2).
- 2. vzorek: **tkanina – pletenina – pletenina – tkanina**
 - po osnově, po sloupcích (označení 3);
 - po útku, po řádcích (označení 4).
- 3. vzorek: **tkanina – pletenina – tkanina – pletenina – tkanina**
 - po osnově, po sloupcích (označení 5);
 - po útku, po řádcích (označení 6).

Celkově bude tedy vyrobeno 6 druhů vzorků.



1. vzorek

2. vzorek

3. vzorek

Obr. 3.1.4 Schéma řezů kompozitem

Po rozmístění všech vrstev na pracovní stůl byla každá z těchto vrstev naimpregnována množstvím pryskyřice, což byl Lukosil M 130. Poté byly nechány všechny vrstvy zavadnout a ustálit, klasicky na vzduchu, po dobu cca 4 hodin.

U tohoto kroku je důležité rovnoměrné rozetření pryskyřice po celé ploše vrstvy. Opět bylo potřeba pracovat opatrně, protože docházelo k deformaci plátňové vazby v tkanině. U pleteniny je potřeba mnohem více pryskyřice na správné prosycení vrstvy.

Po přípravě jednotlivých složek a uplynutí 4 hodin se přistoupilo k vlastnímu vrstvení kompozitu. Jako podkladová vrstva byl zvolen speciální papír, který brání „přípečení“ kompozitu k čelistem lisovacího zařízení. Na tento papír byly nakladeny vrstvy a pro jejich lepší přilnutí opět prosyceny pryskyřicí. Po naložení poslední vrstvy se použil opět speciální papír.

Na místě je zase velmi opatrná práce s tkaninou, aby nedošlo k porušení vazby.

Následovalo vložení celé soustavy vrstev mezi ocelové plechy o šířce 3 mm a rozměrech 23 x 23 cm. Po přiložení vrchního ocelového plechu a vložení 4 šroubu do děr v rozích se plechy navzájem stáhly tak, aby mezera mezi nimi byla **3,5 mm**. Takto připraveno se vložilo do pece na dobu 6 hodin. V peci byla nastavena teplota 200 °C.

Posledním krokem bylo vytažení lisu z pece, jeho rozšroubování a vyjmutí vyrobeného kompozitu. Také jeho očištění od použitého papíru.

*Obr. 3.1.5 Balení Lukosilu M130**Obr. 3.1.6 Plechy pro správné slisování**Obr. 3.1.7 Pec potřebná k vytvrzení kompozitu**Obr. 3.1.8 Speciální papíry*

3.2 Tvorba příčného řezu

3.2.1 Příprava kompozitní desky

Prvním krokem při výrobě vzorku bylo rozčlenění kompozitní desky o rozměrech 21 x 21 cm na kotoučové pile. Zde byl, za pomoci ochranných pracovních pomůcek, tento kompozit rozřezán na proužky o rozměrech 21 x 1 cm a to tak, aby ve výsledku zůstaly proužky řezané po osnově (řádcích) a po útku (sloupcích).

V dalším kroku se tyto proužky upnuly do čelistí svěráku a pilkou s diamantovým listem rozřezaly. Ve finální podobě tedy byly rozměry vzorku 1 cm (zkoumaná plocha) x 0,5 cm.

Pro větší objektivnost pozorování byly vytvořeny od každého z šesti druhů vzorků tři exempláře. Celkový počet vyrobených vzorků je tedy 18.

*Obr. 3.2.1 Kotoučová pila**Obr. 3.2.2 Svěrák + pilka + vzorky*

3.2.2 Příprava příčného řezu

Příčné řezy jsou vyráběny pomocí zalití vzorků do **Dentacrylu**. To je dvousložková metylmetakrylátová licí pryskyřice, určená pro technické použití. Polymeruje samovolně po smísení obou složek. Má velmi dobré izolační vlastnosti, vysokou mechanickou pevnost a dokonalou tepelnou izolaci. Skládá z tekutiny a prášku. Tento roztok se ředil v poměru 2 díly prášku na 1 díl tekutiny. Následovalo řádné rozmíchání v připravené kádince. Muselo se pracovat rychle, protože roztok poměrně rychle tuhl.

Nejprve bylo připraveno mezikruží, které se položilo na pečící papír a do něho nalilo trochu připraveného roztoku. Do tohoto základu se poté pinzetou vložil připravený vzorek a to zkoumanou stranou dolů. Po dobu 30 vteřin se přidržel, aby nedošlo k jeho posunu a po lehkém zatvrdnutí byl dolit roztok z kádinky a to do výšky 2,5 cm - kvůli lepšímu upnutí do brusky. Řezy v Dentacrylu se nechaly zatvrdnout po dobu cca 24 hodin a poté bylo odstraněno mezikruží.



Obr. 3.2.3 Použitý Dentacryl

Obr. 3.2.4 Vzorky v pouzdře
fotofilmu

3.2.3 Tvorba nábrusu

Jednalo se o broušení zalitých řezů na speciální brusce. Tato bruska je opatřena hlavicí, do které se upne celkem 6 vzorků. Brusný pohyb zprostředkovává otočná hlavice a točna, na které je upnut brusný papír. Tyto dvě části se otáčejí protisměrně. Na brusce se nastavily určité parametry, které jsou prověřeny praxí při výrobě takovýchto nábrusů.

Parametry, které bylo třeba nastavit, jsou: - přitlačná síla = 50 N

- otáčky brusné hlavice = 200 ot/min

- množství přiváděné chladicí vody

Dále bylo třeba vložit brusný papír a tento upevnit. U brusného papíru je zásadním údajem jeho zrnitost, přičemž čím vyšší číslo, tím je papír jemnější. Výběr brusného papíru a doba, po kterou se používaly jednotlivé papíry, je znázorněna v Tab. 5.

Tab. 5: Hodnoty cyklů broušení

Zrnitost brusného papíru	Počet výměn brusného papíru	Čas broušení jedním kotoučem (min)	Celkový čas broušení jedním kotoučem (min)
600	8	3	24
1200	6	5	30
2000	6	5	30

Dalším krokem při výrobě příčných nábrusů je leštění diamantovými leštícími pastami o různé jemnosti. Brusný papír byl vyměněn za leštící kotouč, který je vyroben z plsti. Po obvodu kotouče se nanese pasta a mírně zalila lihem. To pomáhá lepšímu přilnutí pasty a její tvárnosti. Označení pasty je takové, že čím nižší číslo pasty, tím je pasta jemnější. Leštění probíhalo při nastavení stále stejných parametrů. Výběr leštící pasty a počet past, které jsou potřeba k vyleštění, je znázorněn v Tab. 6.

Tab. 6: Hodnoty leštících cyklů

Jemnost leštící pasty	Počet použitých past (ks)	Čas leštění jednou pastou (min)	Celkový čas leštění jednou pastou (min)
D3	3	5	15
D2	5	4	20
D0,7	5	4	20

Po dokončení všech operací se všechny vzorky vyndaly a důkladně očistily bavlněným hadříkem. Tento celý cyklus se opakoval ještě dvakrát, aby bylo zpracováno všech 18 vzorků.

Tvorba nábrusů byla časově dosti náročnou operací a doba, po kterou trvala, odpovídala dvěma pracovním dnům.



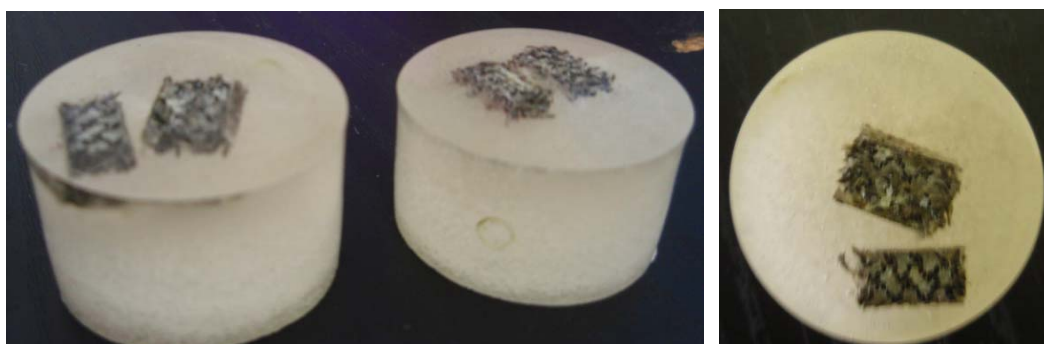
Obr. 3.2.5 Speciální bruska



Obr. 3.2.6 Hlavice brusky



Obr. 3.2.7 Smirkový papír a diamantová pasta



Obr. 3.2.8 Výsledné příčné nábrusy

3.3 Snímání příčných nábrusů

Jedná se o jednu z nejdůležitějších operací celého experimentu. Na této operaci je závislá přesnost veškerých pozorovaných objektů i vyhodnocených výsledků. Veškerá práce je zde prováděna pomocí programu **NIS – Elements 2.3**.

Obraz je na monitor PC přenášen pomocí objektivu 2,5 NIKON, jehož celkové zvětšení je 25x. Při použití zvětšení je logické, že jeden sejmutý obraz je mnohem menší, než jsou skutečné rozměry snímaného nábrusu. A to jak v jeho šířce, tak délce. Proto je nutné, aby byly dílčí obrazy skládány do jednoho celkového obrazu.

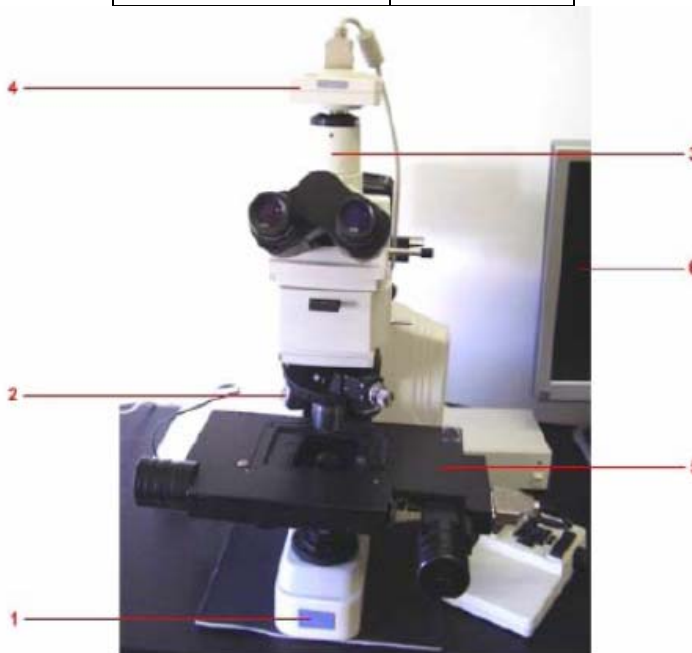
Pro tento účel je vhodné použití tzv. „Složeného obrazu“. Ten umožňuje skládání dílčích obrazů v horizontálním i vertikálním směru. Pracuje tak, že po manuálním sejmutí a uložení prvního krajního obrazu je při dalším kroku načtena a zobrazena pravá polovina předchozího obrazu. Následuje posun nábrusu na posuvném stolku mikroskopu tak, aby pohyblivá část snímaného obrazu navazovala na pravý konec

pevného obrazu. Tento navazující složený obraz je uložen a celý postup se opakuje, dokud není nasnímána a složena celá délka nábrusu. Poté se obraz pomocí pohyblivého stolku přesune na další řádek, který má být snímán. Tento proces se opakuje až do doby, kdy je nasnímán celkový složený obraz.

Podmínky, za kterých byly příčné nábrusy snímány, jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7: Podmínky snímání

Parametr snímání	Hodnota
Zvětšení	5x
Zesílení	1,7x
Expozice	800
Úhel kamery	max. 2°
Kalibrace	1,35 μm / px
Kontrast	střední
Mód	manuál



Obr. 3.3.1 Snímací sestava [12] – 1-spodní osvit, 2-objektiv, 3-nástavec kamery, 4-digitální kamera, 5-automatický stolek, 6-monitor počítače

3.3.1 Příprava příčných nábrusů ke snímání

Dokonale vybroušené vzorky se pomocí klasické modelíny přidělaly na podložní sklíčko, díky kterému je usnadněna práce s ustálením a vložením vzorku na snímací stolek. Přidělání vzorku na sklíčko bylo prováděno pomocí lisu. Ten zabezpečil, že se vzorek zarovnal do vodorovné polohy a nebylo potřeba jej při snímání každého obrazu znovu ostřit, pouze lehce doostřovat.



Obr. 3.3.2 Pomocný lis

3.3.2 Snímání příčných nábrusů

Před začátkem vlastního snímání bylo samozřejmostí zkontrolovat funkčnost všech důležitých částí sestavy, tzn. vlastní PC, snímací stolek, kameru a mikroskop.

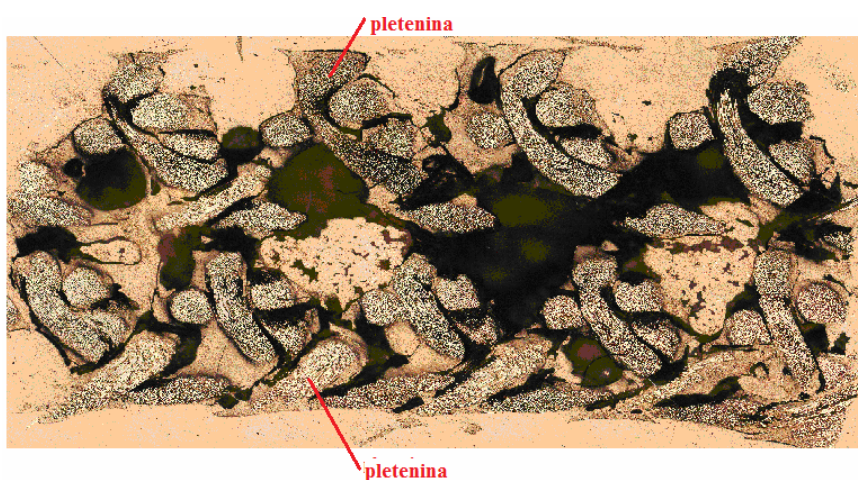
Prvním úkolem bylo přesunutí stolku do výchozí polohy (zařízení – správce zařízení – nastavit – reset). Následovalo nastavení požadovaného zvětšení (5x). Po tomto kroku je nejlepší, zkontrolovat obraz „okem“ přímo v mikroskopu. To je zaručeno přesunutím manuální páčky, popřípadě doostřením zaostřovacím šroubem mikroskopu. Poté se nastavil kurzor na pravý dolní roh vzorku a začalo snímání obrazu (snímání – velký obraz automaticky - živý). Poté zaostřit jemným šroubem a naskenovat (skenovat – OK). Tento proces se opakuje až do nasnímání celého obrazu a jeho složení.

Poslední částí je uložení obrazu ve formátu .jp2 a .jpg (soubor – uložit jako). A to z důvodu možnosti prohlížení snímků i bez programu NIS – Elements 2.3. To je možné v klasickém fotoshopu Windows.

Při snímání příčných nábrusů bylo zjištěno, že při stlačení se pleteniny v druzích kompozitu s vyšším počtem vrstev velmi zdeformovaly a není z nábrusů zcela patrná, jejich struktura (sloupky - řádky). Tkaniny ale zůstaly méně deformované a jejich struktura je velmi dobře viditelná (osnova – útek).

Druh kompozitu č. 1

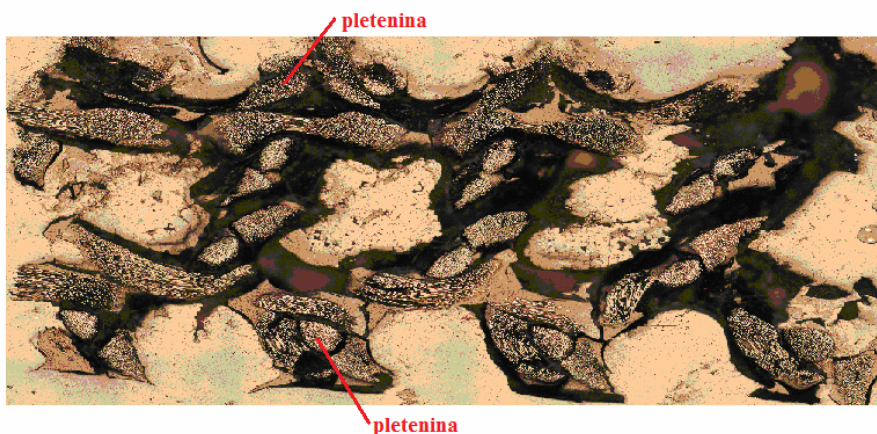
Druh kompozitu č.1 je složen ze dvou vrstev pleteniny, které jsou řezány a broušeny po řádcích pleteniny. Je zde možno pozorovat sloupky pleteniny a příčné průřezy vláken.



Obr. 3.3.3 Příčný nábrus kompozitu – druh č. 1

Druh kompozitu č. 2

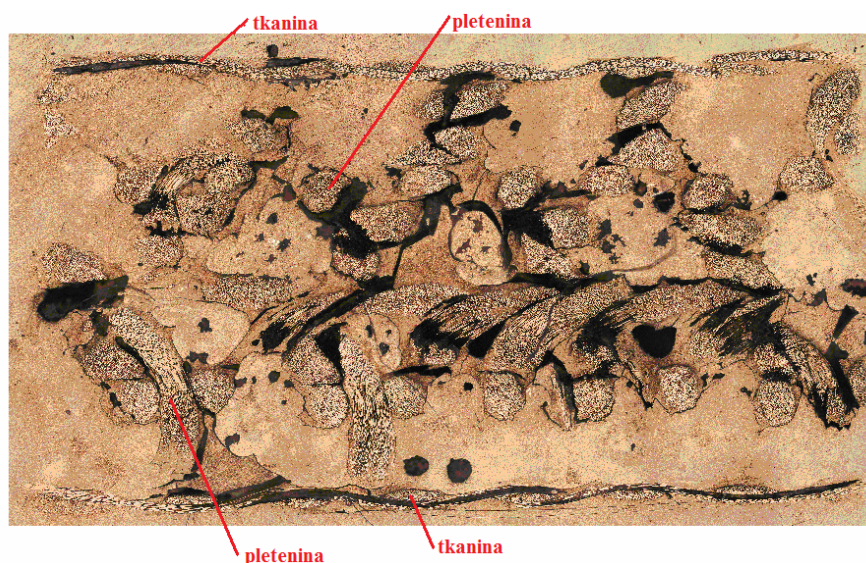
Druh kompozitu č.2 je složen ze dvou pletenin, které jsou řezány a broušeny po sloupcích. Je zde patrné, že struktura pleteniny je v řádcích volnější a soustava je více roztažena. Pletenina není držena tkaninou a je značně zdeformována.



Obr. 3.3.4 Příčný nábrus kompozitu – druh č. 2

Druh kompozitu č. 3

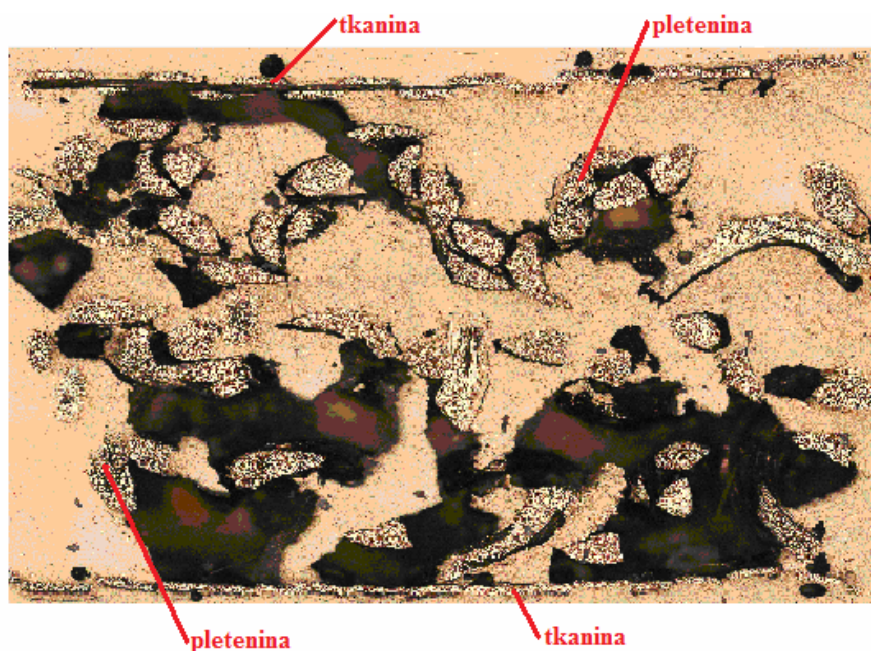
Druh kompozitu č.3 je složen ze čtyř vrstev. Dvě vrstvy tkanin zpevňují jeho strukturu v krajích. Mezi tkaninami jsou vloženy dvě vrstvy pletenin. Tkaniny jsou v tomto případě řezány a broušeny po osnově a pleteniny po sloupcích. Je zde patrná volnější struktura řádků pleteniny, příčné průřezy útkovou soustavou tkaniny a podélné prohnutí osnovního multifilu.



Obr. 3.3.5 Příčný nábrus kompozitu – druh č. 3

Druh kompozitu č. 4

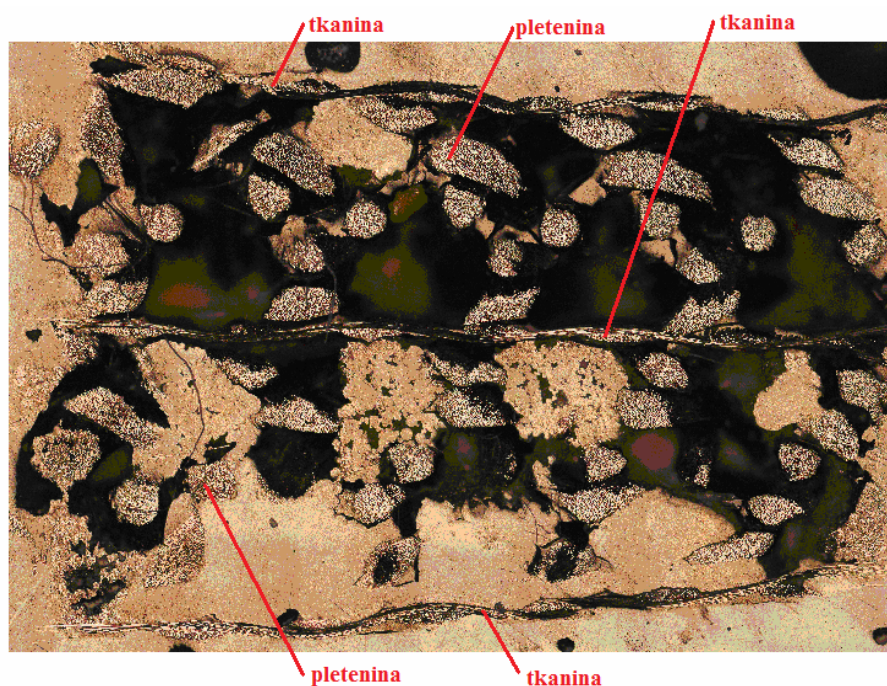
Druh kompozitu č.4 je vrstven ze čtyř vrstev. Dvě vrstvy tkanin jsou po krajích kompozitu. Mezi tkaninami se nachází dvě vrstvy pletenin. Tkaniny jsou řezány a broušeny po útku, pleteniny po řádcích. Struktura pleteniny zde není z důvodu navázání vzduchových bublin příliš patrná. Na pohledu jsou ale dobře patrné příčné průřezy osnovní soustavou tkaniny a podélné útkové multifily, které jsou nezvlněné.



Obr. 3.3.6 Příčný nábrus kompozitu – druh č. 4

Druh kompozitu č. 5

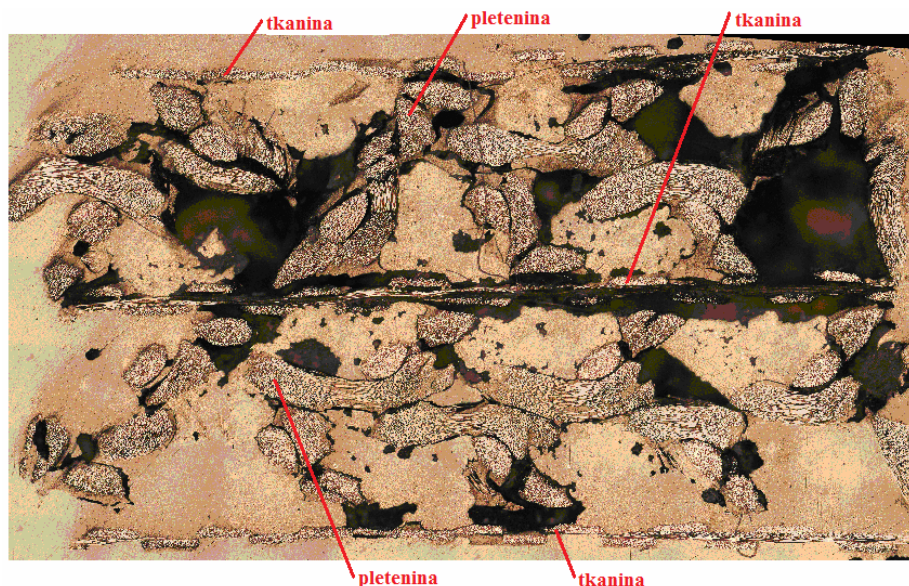
Druh kompozitu č.5 je vrstven z pěti vrstev. Dvě vrstvy tkanin se nachází v krajích kompozitu. Mezi nimi jsou vloženy dvě vrstvy pleteniny. Třetí vrstva tkaniny je vložena mezi pleteniny. Tkaniny jsou řezány a broušeny po osnově a pleteniny po sloupcích. Dobře viditelné jsou průřezy útkovými multifily a podélné osnovní multifily.



Obr. 3.3.7 Příčný nábrus kompozitu – druh č. 5

Druh kompozitu č. 6

Druh kompozitu č.6 je složen z pěti vrstev. Dvě vrstvy tkaniny jsou na krajích kompozitu. Mezi nimi jsou vloženy dvě vrstvy pleteniny. Mezi tyto vrstvy je vložena tkanina. Tkaniny jsou řezány a broušeny po útku a pleteniny po řádcích. Jsou zde patrné průřezy osnovních multifilů a podélný útkový multifil, a to jak na krajích, tak ve středu kompozitu.



Obr. 3.3.8 Příčný nábrus kompozitu – druh č. 6

3.3.3 Imperfekce struktury

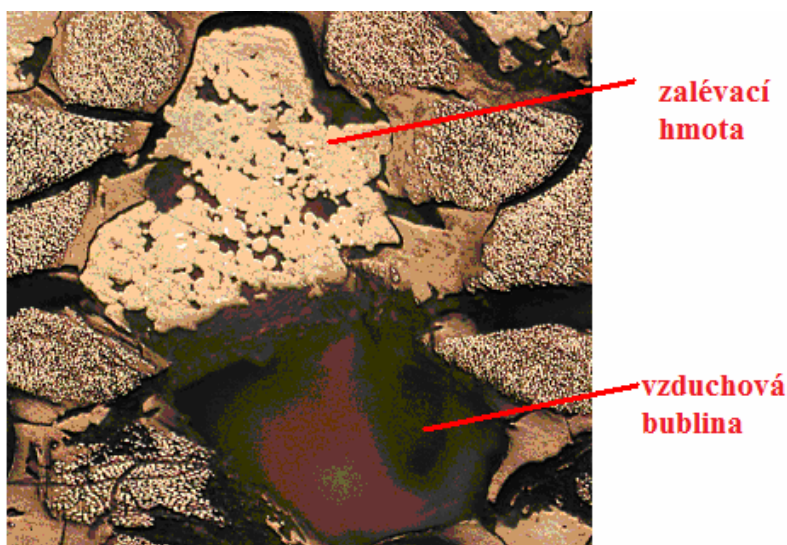
Imperfekce jsou defekty ve struktuře kompozitu, vzniklé při mechanických, chemických, fyzikálních procesech. Mapují se z důvodu hledání zákonitostí, které by se mohly přenést do modelovacích programů. Nasnímané obrazy struktury byly detailně prohlíženy a dle kapitoly 2.3.3 bylo zkoumáno, jestli se imperfekce uvedené ve zmiňované kapitole nalézají i v těchto strukturách. Po prozkoumání byly nalezeny tyto imperfekce.

Na Obr. 3.3.9 je patrné vytržené vlákno, které se vytrhlo z pleteniny v důsledku výrobního procesu. Tento jev mohl být způsoben nedostatečnou fixací vlákna nebo úplnou absencí matrice v místě.



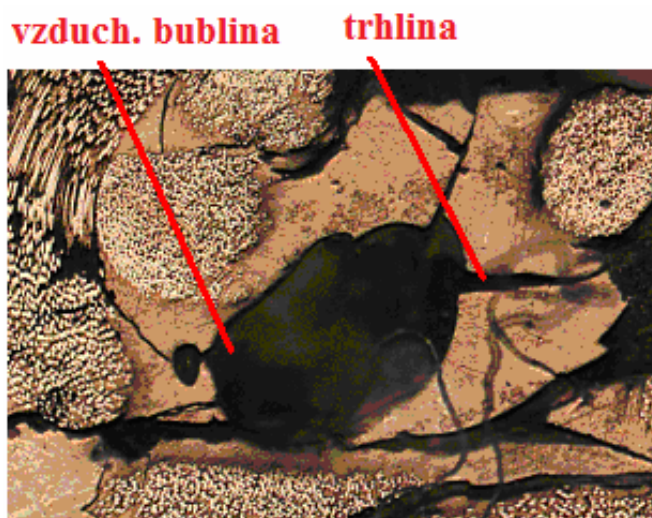
Obr. 3.3.9. Vytržené vlákno

Na Obr. 3.3.10 jsou viditelné zbytky zalévací hmoty. Tento jev by se dal pravděpodobně odstranit vyšším zabroušením příčných řezů před snímáním. Nelze to ale tvrdit jednoznačně. Patrně se jedná o místo, které má zvýšenou afinitu k zalévacímu materiálu. Dobře patrná je zde i vzduchová bublina, která vznikla kvůli neproniknutí pryskyřice do všech míst kompozitu.



*Obr. 3.3.10 Zalévací hmota ve vzduchové
bublině mezi vrstvami*

Obr. 3.3.11 zachycuje dutinu - vzduchovou bublinu, ze které se šíří trhlina. Je zde patrný rozdíl mezi těmito strukturními prvky.



*Obr. 3.3.11 Vzduchová bublina, trhlina
mezi vlákennými vrstvami*

Obr. 3.3.12 znázorňuje zvrásnění v matrici. Bylo způsobeno s největší pravděpodobností nerovnoměrným sesycháním matrice v celé délce kompozitu při jeho výrobě.



Obr. 3.3.12 Zvrásnění matrice

Na Obr. 3.3.13 jsou viditelné ulomené fibrily multifilu. To pravděpodobně nastalo mechanickým porušením v důsledku vysokého tlaku lisu při výrobě kompozitu.



Obr. 3.3.13 Lom multifilu v rámci tkaniny

Imperfekce jsou zmíněny pouze orientačně na ukázkových snímcích. Z důvodu časové náročnosti a obsahu tohoto problému byl prozkoumán malý počet snímků. Do budoucna by bylo dobré udělat další nábrusy a prozkoumat více nábrusů detailněji.

3.4 Zpracování obrazu

3.4.1 Segmentace objektů

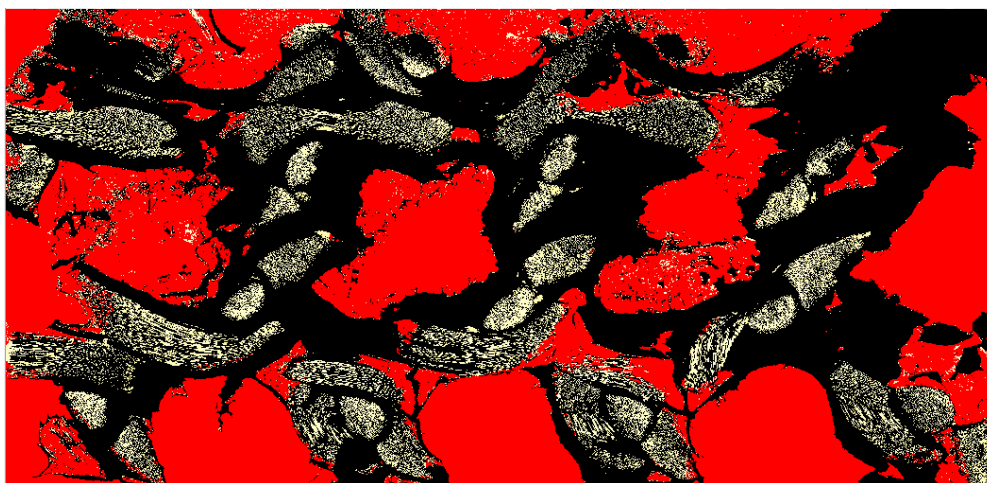
Operace použité při segmentaci objektů

- *Upravení kontrastu* – Rozdíl mezi hledanou plochou a okolím musí být co největší.
- *Prahování obrazu* – Pomocí „Definice prahování“ se nastavují hodnoty tak, aby byl obraz naprahován co nejdokonaleji.
- *Eroze* – Operace, která lépe zvýraznila hledané objekty a velké plochy rozdělila na menší objekty.
- *Dilatace* – Operace, která zvětší objekty – k objektu je přidána slupka.
- *Editor binárního obrazu* – Tento krok byl využíván pouze v některých případech a to už jen ke konečné úpravě.
- *Uložení obrazu* – Vzhledem k velikosti obrazů je nutné před měřením tento krok zařadit.

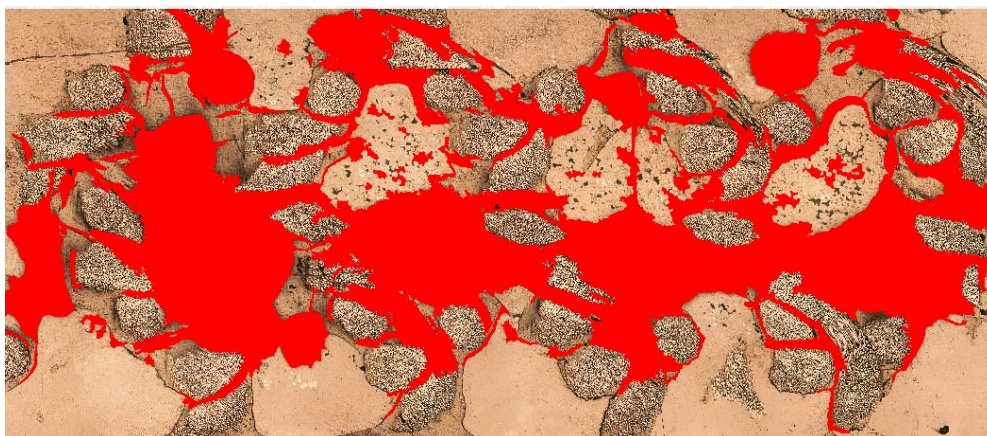
Tyto příkazy nebyly použity vždy hromadně. Výběr operací se lišil podle druhu snímaného objektu. Příklad segmentace je zobrazen na obr. 3.4.1 a 3.4.2. Konkrétní použití operací je uvedeno v Tab. 8.

Tab. 8: Postup segmentace objektů

Druh operace	Matrice	Vzduchové bubliny
Upravení kontrastu - hm180/dm120	x	x
Prahování obrazu – R 255, G 241, B 98	x	x
Binární eroze – matice hodnoty 33		x
Binární dilatace – matice hodnoty 4	x	
Editor binárního obrazu	x	x
Uložení	x	x



Obr. 3.4.1 Segmentace matrice z kompozitu



Obr. 3.4.2 Segmentace vzduchových bublin z kompozitu

3.4.2 Měření nasnímaných obrazů

Postup při měření dat:

- *Příznaky pro měření objektů* – Parametry, které se vyhodnocovaly.
- *Měření objektů* – Obraz se proměřil a nabídl výsledky měření.
- *Export dat* - Výsledky byly převedeny do programu MS Office Excel.

Použité parametry pro snímání – příznaky měření:

Plocha (Area)

Plocha je základní příznak vypovídající o velikosti objektu. V nekalibrovaném obrazu představuje počet pixelů, v kalibrovaném pak reálnou velikost plochy.

Ekvivalentní průměr (EqDiameter)

Ekvivalentní průměr je příznak velikosti odvozený z plochy. Určuje průměr kružnice, která má stejnou plochu jako odpovídající objekt.



Obr. 3.4.3 Ekvivalentní průměr

Obvod (Perimeter)

Obvod je mírou celkové hranice. Zahrnuje jak vnější, tak i vnitřní hranici (jestliže jsou uvnitř objektu díry). Obvod se počítá ze čtyř projekcí ve směrech 0, 45, 90 a 135 stupňů.

Maximální průmět (MaxFeret)

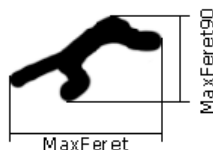
Maximální Feretův průmět je maximum z Feretových průmětů. Obecně se Feretův průmět při úhlu α rovná délce projekce objektu při úhlu α , $\alpha = (0^\circ, 180^\circ)$. Systém NIS – Elements počítá Feretův průměr pro $\alpha = 0, 10, 20, 30, \dots, 180$ stupňů.

Minimální průmět (MinFeret)

Minimální Feretův průmět je minimum z Feretových průmětů. Obecně se Feretův průmět při úhlu α rovná délce projekce objektu při úhlu α , $\alpha = (0^\circ, 180^\circ)$. Systém NIS – Elements počítá Feretův průměr pro $\alpha = 0, 10, 20, 30, \dots, 180$ stupňů.

Maximální průmět 90 (MaxFeret 90)

Maximální průmět 90 je délka průmětu kolmého na maximální Feretův průmět.



Obr. 3.4.4 Maximální průmět 90

Kruhovitost (Circularity)

Kruhovitost se rovná 1 pro kruh. Všechny ostatní tvary jsou charakterizovány kruhovitostí menší než 1. Je to odvozená míra tvaru počítaná z plochy a obvodu. Tento příznak je užitečnou charakteristikou tvaru. [11]

3.4.3 Zpracování dat

Pomocí obrazové analýzy byly na všech osmnácti nábrusech nasnímány tyto hodnoty:

- Plocha;
- Ekvivalentní průměr;
- Obvod;
- Maximální průmět;
- Minimální průmět;
- Maximální průmět 90;
- Kruhovitost.

Samostatným výpočtem byl vypočten poměr naprahované plochy k celkové ploše rámečku. U každého nábrusu se zjistila celková suma plochy všech naprahovaných objektů a vložila do vztahu k celkové ploše rámečku. Pro lepší názornost a porovnání se zanesly hodnoty všech tří složek (matrice, vzduchové bubliny, výztuž) do jednoho grafu.

4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Vyhodnocení výsledků se provádělo ze dvou hledisek - statistického zpracování a vizuální interpretace obrazu. Vše bylo pozorováno z úrovně makrostruktury. Při zpracování obrazu byly měřeny tyto parametry: *plocha*, *ekvivalentní průměr*, *obvod*, *max. průmět*, *min. průmět*, *max. průmět 90*, *kruhovitost*. Dále byly pozorovány strukturní imperfekce, které jsou více rozebrány v kapitole 3.3.3.

4.1 Výsledky měření

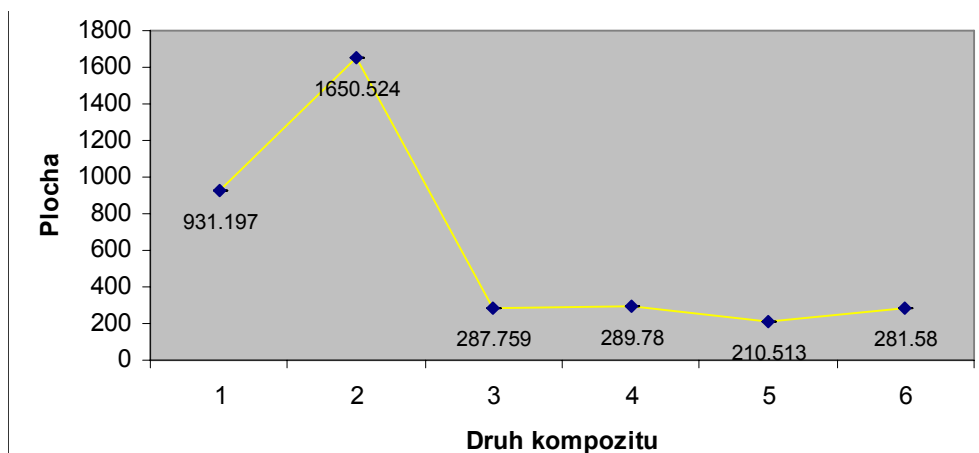
Tato kapitola uvádí přehledně průměrné výsledky měření jednotlivých znaků, zvlášť pro matrici a vzduchové bubliny.

4.1.1 Matrice

Tab. 9: Matrice - průměrné hodnoty naměřených parametrů

matrice	plocha [μm ²]	ekvPrůměr [μm]	obvod [μm]	maxPrůmět [μm]	minPrůmět [μm]	maxPrůmět 90 [μm]	kruhovitost [1]
druh 1	931.197	6.825	130.893	12.329	6.713	7.172	0.776
druh 2	1650.52	6.474	88.475	11.43	6.175	6.57	0.794
druh 3	287.759	3.403	31.122	5.501	3.061	3.231	0.844
druh 4	289.78	3.117	25.163	4.787	2.747	2.878	0.859
druh 5	210.513	3.561	30.195	5.902	3.104	3.272	0.826
druh 6	281.58	3.165	28.289	5.027	2.756	2.897	0.854

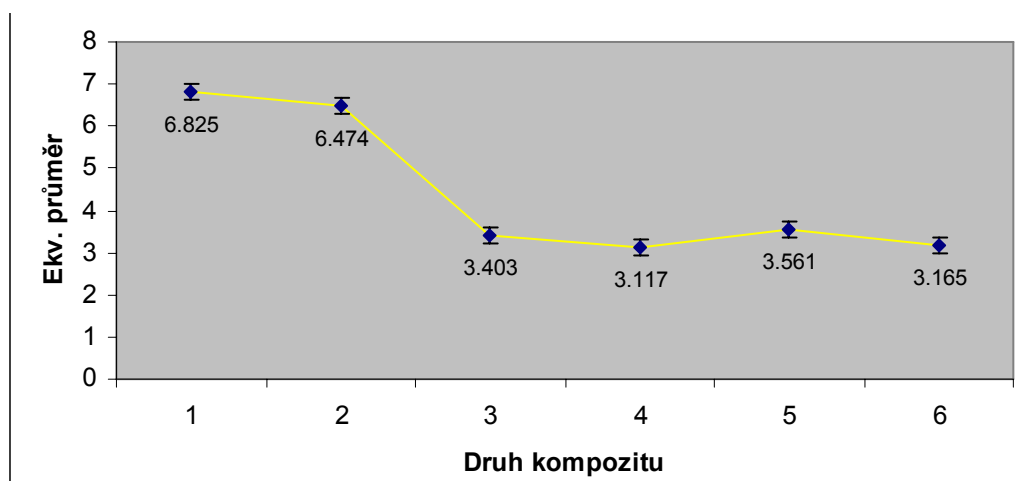
PLOCHA



Obr. 4.1.1 Graf závislosti průměrné plochy na druhu kompozitu

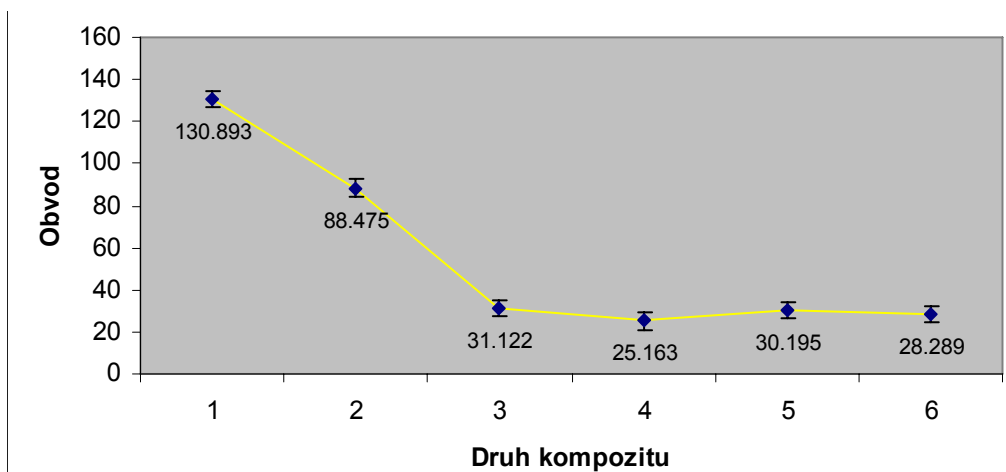
U druhu č.1 a č.2 je plocha největší, což je správný výsledek, který vyplývá z volnější struktury pleteniny, ze které jsou tyto druhy složeny. Ta napomáhá lepšímu prosycení maticí. Ostatní druhy měly plochu matrice na přibližně stejné hodnotě.

EKVIVALENTNÍ PRŮMĚR

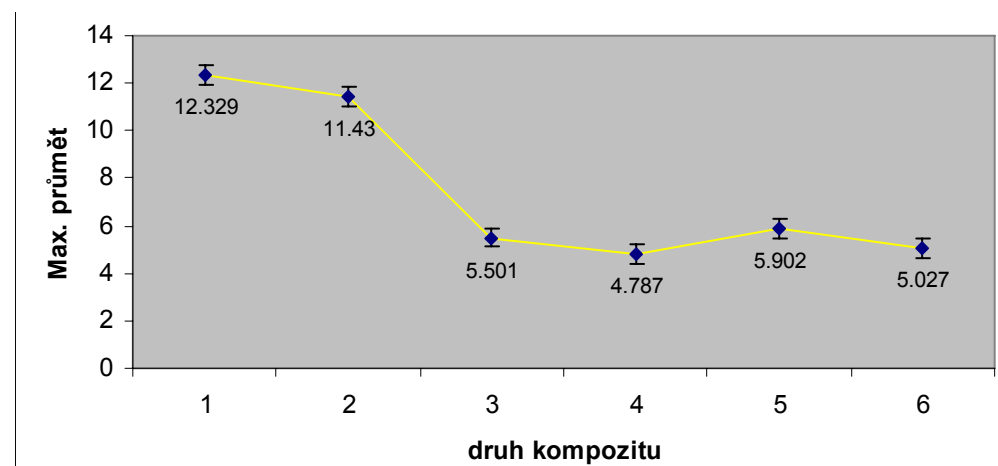


Obr. 4.1.2 Graf závislosti ekvivalentního průměru na druhu kompozitu

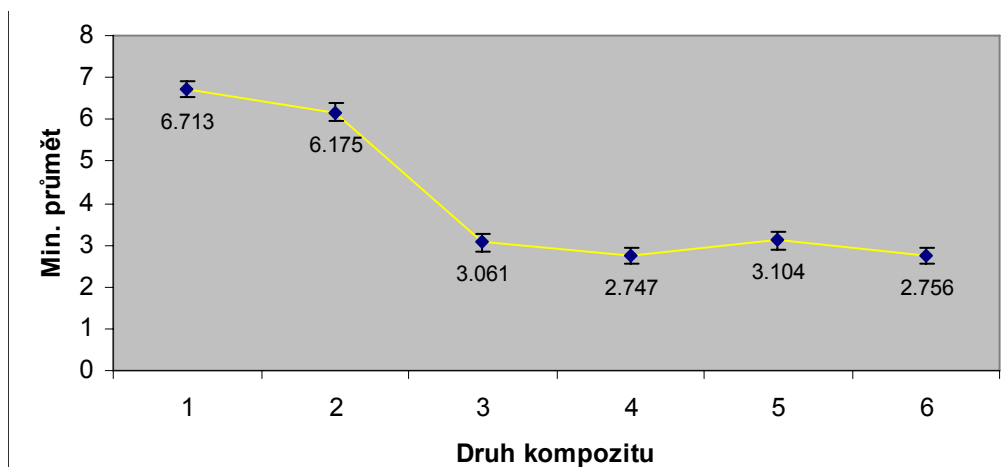
Ekvivalentní průměr měl nejvyšší hodnoty u druhu č.1 a č.2. Ostatní druhy měly menší, přibližně stejné hodnoty. To potvrzuje závislost ekvivalentního průměru na ploše, která říká, že tento parametr je průměr kružnice, která má stejnou hodnotu plochy, jako je velikost plochy objektu.

OBVOD*Obr. 4.1.3 Graf závislosti obvodu na druhu kompozitu*

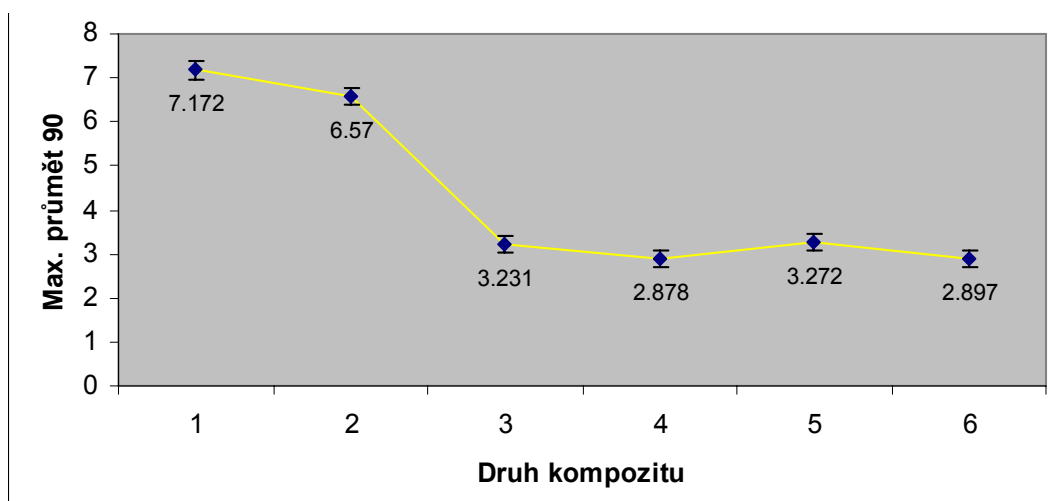
Největší obvod měly druhy č.1 a č.2. Tento výsledek se dal očekávat, vzhledem k tomu, že se jedná o pleteniny a ty mají volnější strukturu. Další druhy kompozitů byly opět na velmi podobných hodnotách.

MAX. PRŮMĚT*Obr. 4.1.4 Graf závislosti maximálního průmětu na druhu kompozitu*

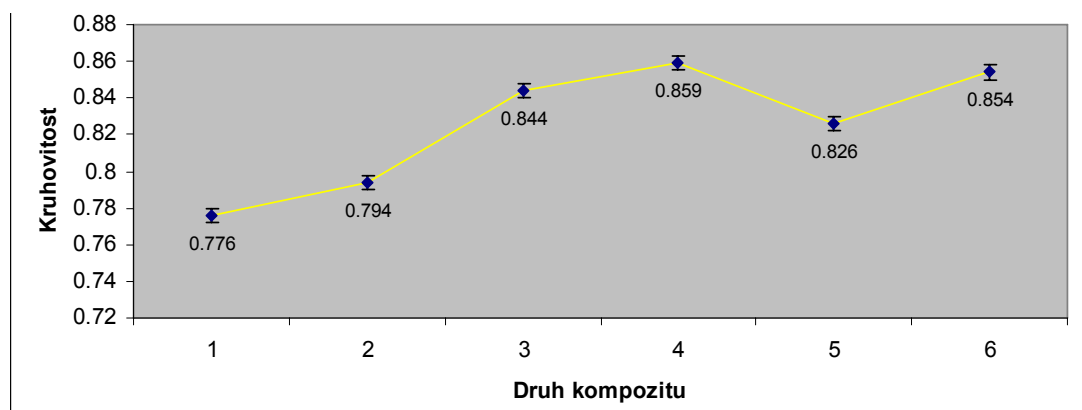
Hodnoty maximálního průmětu byly nejvyšší u druhu č.1 a č.2. Příčinou může být větší prostor, který poskytuje pletenina matici. Roli může hrát také volnější struktura pleteniny. Ostatní druhy se nijak nevymykají a jejich výsledky jsou přibližně stejné.

MIN. PRŮMĚT*Obr. 4.1.5 Graf závislosti minimálního průmětu na druhu kompozitu*

Hodnoty opět nejvyšší u druhu č.1 a č.2. Zde je výsledek očekávatelný v důsledku předchozího výsledku maximálního průmětu. Ostatní druhy nijak nevybočují, jejich hodnoty jsou velmi podobné.

MAX. PRŮMĚT 90*Obr. 4.1.6 Graf závislosti maximálního průmětu 90 na druhu kompozitu*

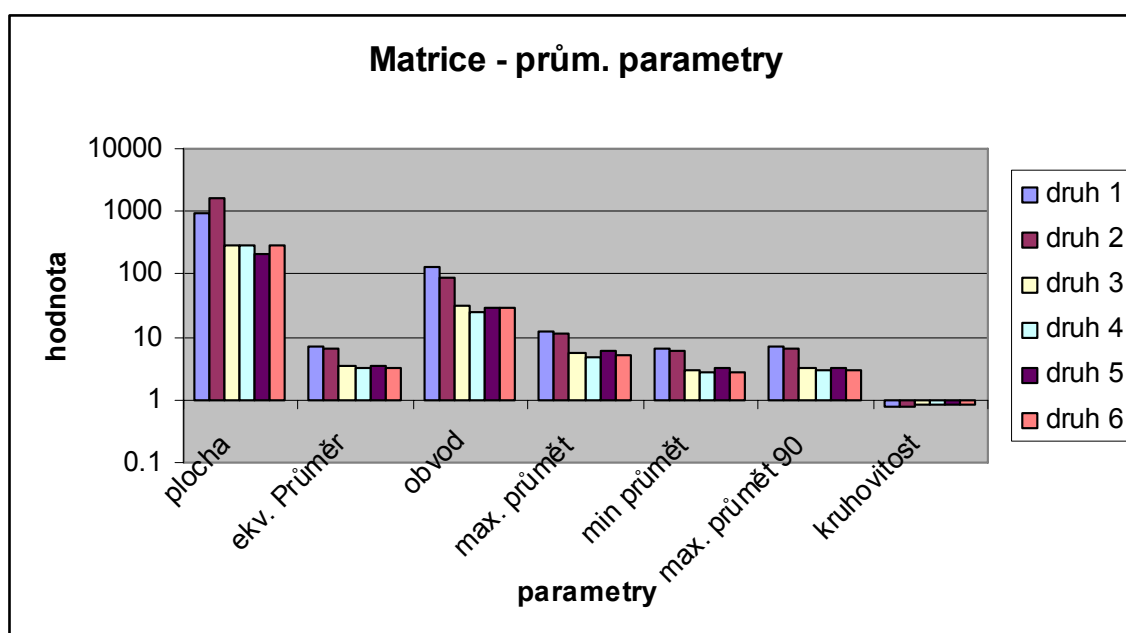
U tohoto parametru platí stejné předpoklady, jako u předchozího min. průmětu. Tzn. Je zde patrná úměra s parametrem maximální průmět. Výsledky ostatních druhů jsou stále ve stejné rovině.

KRUHOVITOST

Obr. 4.1.7 Graf závislosti kruhovitosti na druhu kompozitu

Zde vyšly u druhu č. 1 a č.2 nízké hodnoty kruhovitosti. Důvodem může být větší prostor v kompozitu a tím rozlévání matrice do různých štěrbin a tím vytváření nekruhových útvarů. Nejvyšší hodnoty vyšly u druhu č.5 a č.6, což může být následek vysokého počtu vrstev tkaniny a tím vyššího stupně stlačení.

Celkové porovnání naměřených průměrných hodnot parametrů v závislosti na druhu kompozitu:



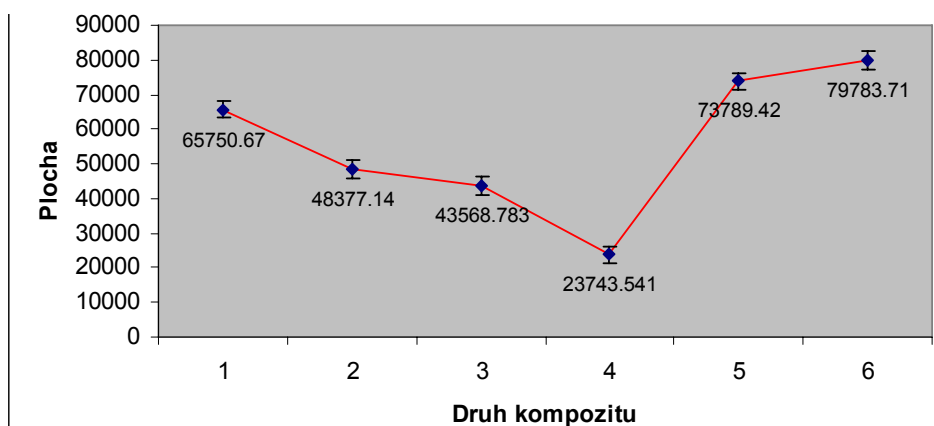
Obr. 4.1.8 Graf výsledků průměrných hodnot jednotlivých parametrů

4.1.2 Vzduchové bubliny

Tab. 10: Vzduchové bubliny – průměrné hodnoty naměřených parametrů

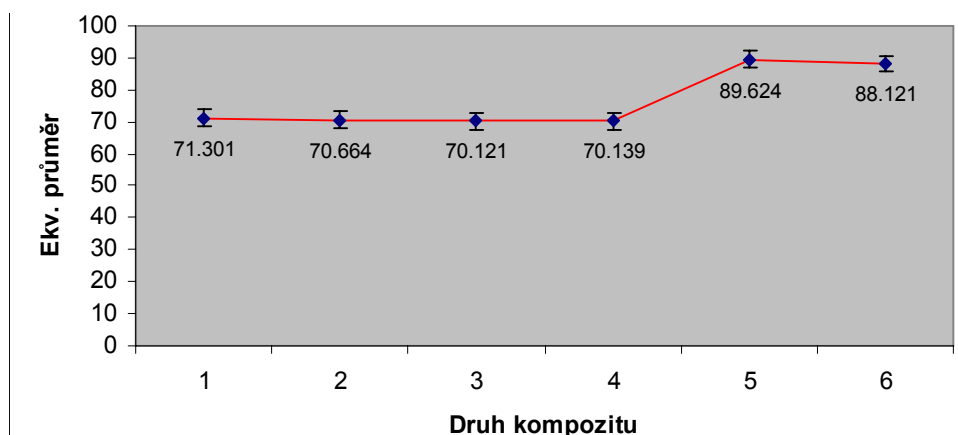
vzduch	plocha [μm ²]	ekvPrůměr [μm]	obvod [μm]	maxPrůmět [μm]	minPrůmět [μm]	maxPrůmět 90 [μm]	kruhovitost [1]
druh 1	65750.67	71.301	760.065	181.916	84.626	92.634	0.532
druh 2	48377.14	70.664	781.765	149.121	74.721	83.634	0.534
druh 3	43568.78	70.121	585.642	141.188	67.477	73.34	0.538
druh 4	23743.54	70.139	521.399	146.336	68.106	74.912	0.51
druh 5	73789.42	89.624	865.689	144.26	60.995	69.015	0.541
druh 6	79783.71	88.121	863.959	136.358	61.298	67.68	0.546

PLOCHA

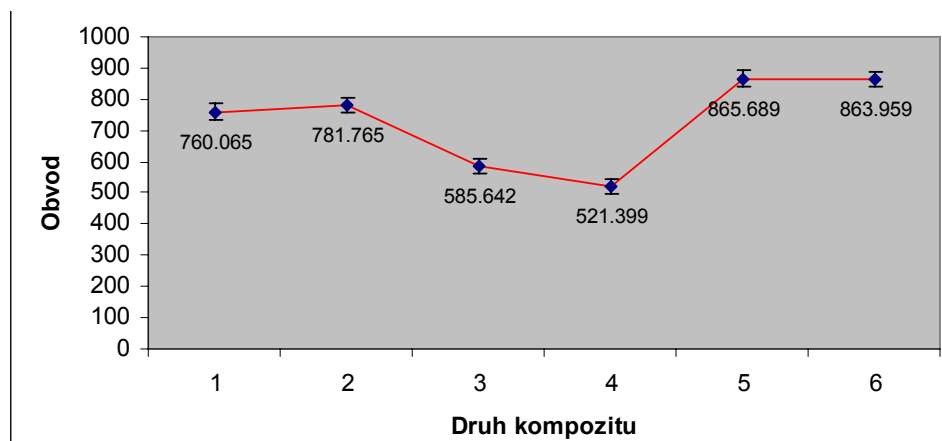


Obr. 4.1.9 Graf závislosti plochy na druhu kompozitu

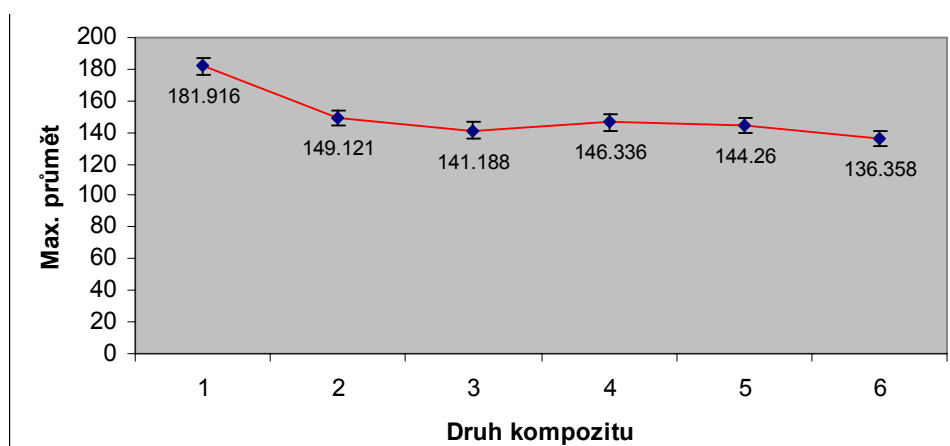
Největší plocha vyšla u druhu č.5 a č.6. Jedním z důvodů může být počet kladených vrstev, z kterých je kompozit složen. Je zde větší riziko navázání vzduchu na vlákna a také zde hraje roli složitost kompozitu. Nejmenší plocha vyšla u druhu. č.4. To bylo zřejmě dáno větším stlačením při přípravě.

EKVIVALENTNÍ PRŮMĚR*Obr. 4.1.10 Graf závislosti ekv. průměru na druhu kompozitu*

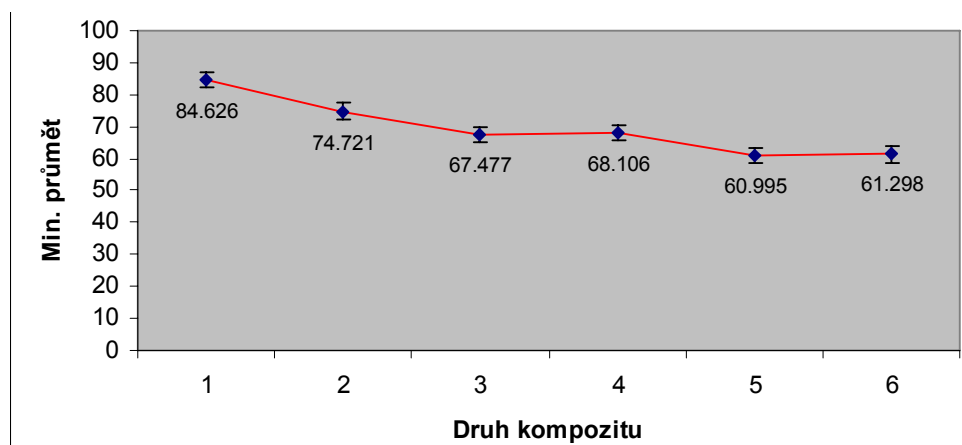
Tento parametr má výsledky velmi podobné, jako předchozí. To potvrzuje závislost ekvivalentního průměru na ploše, která říká, že tento parametr je průměr kružnice, která má stejnou hodnotu plochy, jako je velikost plochy objektu. U druhu č.5 a č.6 vyšly hodnoty nejvyšší. Ostatní hodnoty si jsou velmi podobné.

OBVOD*Obr. 4.1.11 Graf závislosti obvodu na druhu kompozitu*

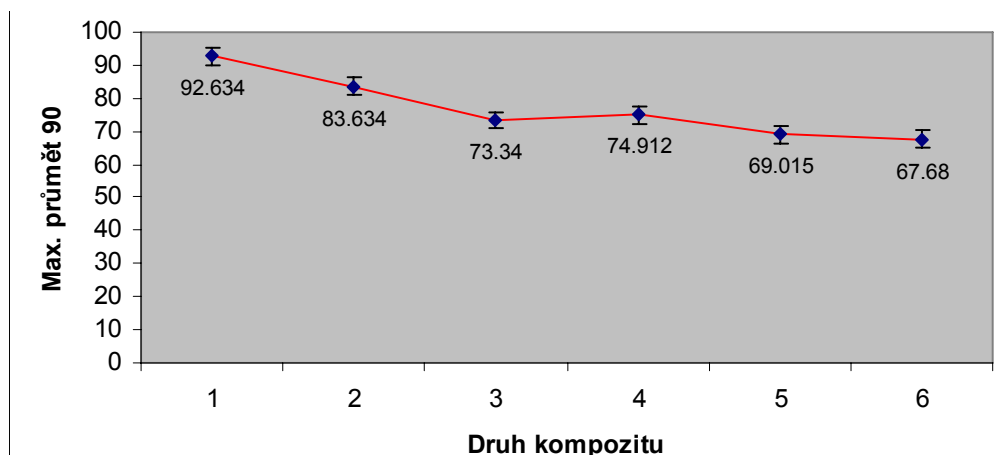
Druh č.5 a č.6 má nejvyšší hodnoty. Tento výsledek je očekávatelný, protože jsou u těchto druhů i nejvyšší hodnoty plochy. Jestliže byla u těchto druhů plocha vyšší, je zde předpoklad vyšších hodnot obvodů.

MAX. PRŮMĚT*Obr. 4.1.12 Graf závislosti maximálního průmětu na druhu kompozitu*

Nejvyšší hodnoty jsou u druhu č.1 a č.2, což může mít příčinu v tom, že pletenina dává větší prostor pro vytváření větších laločnatých objektů. Její struktura je volnější. Není zde ale takový rozdíl mezi druhy pouze pletenými a kombinovanými, jaký byl předpokládán v důsledku volnější struktury pleteniny.

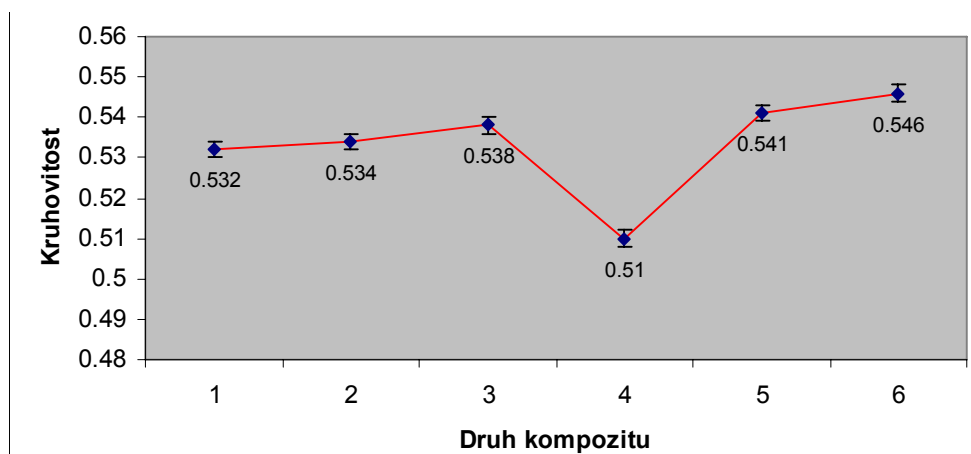
MIN. PRŮMĚT*Obr. 4.1.13 Graf závislosti minimálního průmětu na druhu kompozitu*

Zde byl výsledek očekávatelný, vzhledem k výsledku maximálního průmětu. Existuje zde předpoklad, že pokud jsou vyšší hodnoty maximálního průmětu, budou hodnoty minimálního průmětu také vyšší. Tzn. nejvyšší hodnoty se vyskytují u druhu č.1 a č.2. Rozdíly hodnot všech druhů jsou zde ale minimální.

MAX. PRŮMĚT 90

Obr. 4.1.14 Graf závislosti maximálního průmětu 90 na druhu kompozitu

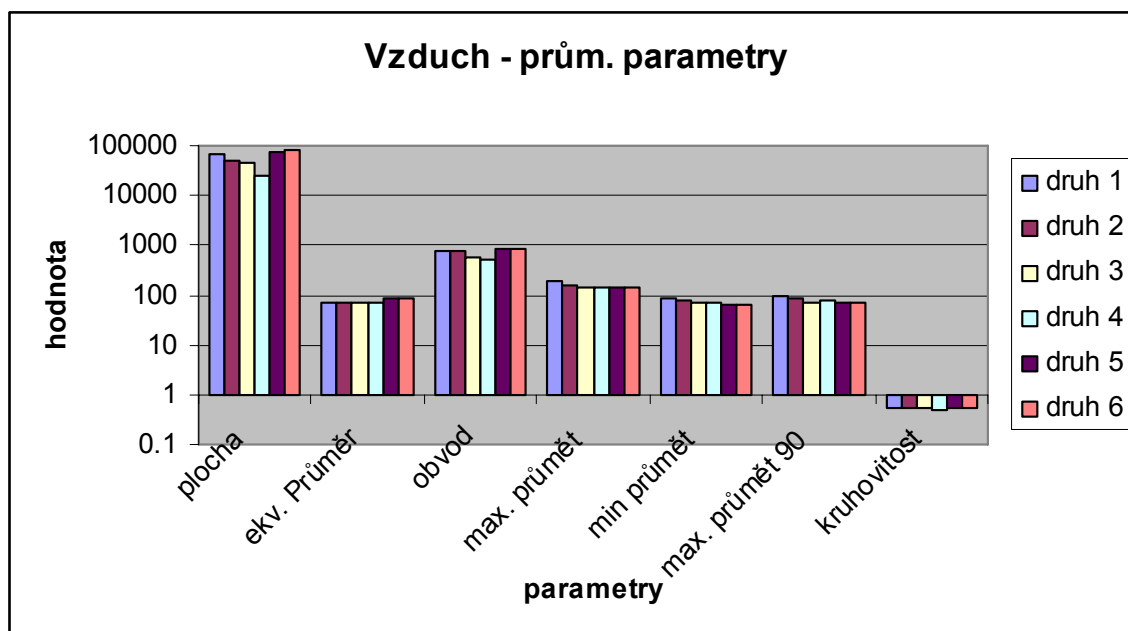
U tohoto grafu je výsledek v podstatě stejný a očekávaný, jako u předchozích dvou parametrů. Tzn. Je zde patrná úměra s parametrem maximální průmět. Výsledky ostatních druhů jsou stále ve stejné rovině. Opět zde nejsou příliš velké rozdíly v hodnotách.

KRUHOVITOST

Obr. 4.1.15 Graf závislosti kruhovitosti na druhu kompozitu

U kruhovitosti vyšel opět zajímavý výsledek, jako tomu bylo v případě matrice. Je znatelné, že zde není příliš velká závislost na jiném měřeném parametru. V hodnotách může hrát významnou roli míra stlačení kompozitu, počet vrstev tkaniny a vázání bublin na tkaninu. Druhy č.5 a č.6 mají totiž počet vrstev tkaniny nejvyšší, tzn. vzduch se nedostal do tenkých štěrbin.

Celkové porovnání naměřených průměrných hodnot parametrů v závislosti na druhu kompozitu:



Obr. 4.1.16 Graf výsledků průměrných hodnot jednotlivých parametrů

4.2 Vzájemné korelace jednotlivých parametrů

V této části byl vyhodnocován další parametr – korelace (vzájemné závislosti naměřených parametrů). Výsledkem jsou podrobné tabulky (Tab. 11 až 22) pro každý druh kompozitu, a to jak pro složku matrice tak vzduchových bublin, které zobrazují vzájemné korelační koeficienty. Výběr parametrů byl zvolen v závislosti na předchozí úloze. Důvodem výpočtu korelačních koeficientů bylo zjištění výše závislosti jednotlivých parametrů na ploše objektu. Z výsledků je patrné, že zvolené parametry mají silnou matematickou závislost na ploše. Jiné druhy parametrů nebyly zvoleny, jednalo se o jeden z prvních pokusů popisu takového typu struktury (pletenina – tkanina) a tudíž bylo nejprve potřeba udělat celkový obraz objektů, které ve struktuře vznikají.

4.2.1 Matrice

Jak vyplývá z hodnot korelačních koeficientů, u všech druhů kompozitů je mezi měřenými parametry sledována poměrně silná přímá korelační závislost, kdy se korelační koeficienty mění maximálně o jednu desetinu. Nejvyšší hodnoty závislosti na ploše byly zaznamenány u obvodu. Jedinou výjimkou je kruhovitost, jejíž hodnoty měly na ostatních parametrech velmi slabou nepřímou závislost. Je to dáno výběrem měřených parametrů. Kromě kruhovitosti jsou všechny ostatní parametry nějakým způsobem závislé na ploše a tedy i na sobě navzájem.

Kompozit č. 1

Tab. 11: Matrice, druh č.1 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.906063428	0.934762497	0.859035103	0.899434987	0.91072121	-0.079027477
ekv. Průměr	0.906063428	1	0.902366798	0.982668705	0.984395211	0.980448281	-0.279838486
obvod	0.934762497	0.902366798	1	0.880657535	0.91965323	0.914573761	-0.100044656
max.průmět	0.859035103	0.982668705	0.880657535	1	0.959994333	0.946856181	-0.29777988
min. průmět	0.899434987	0.984395211	0.91965323	0.959994333	1	0.989983415	-0.273085432
max. průmět 90	0.91072121	0.980448281	0.914573761	0.946856181	0.989983415	1	-0.260173089
kruhovitost	-0.079027477	-0.279838486	-0.100044656	-0.29777988	-0.273085432	-0.260173089	1

Kompozit č. 2

Tab. 12: Matrice, druh č.2 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.906063428	0.934762497	0.859035103	0.899434987	0.91072121	-0.079027477
ekv. Průměr	0.906063428	1	0.902366798	0.982668705	0.984395211	0.980448281	-0.279838486
obvod	0.934762497	0.902366798	1	0.880657535	0.91965323	0.914573761	-0.100044656
max.průmět	0.859035103	0.982668705	0.880657535	1	0.959994333	0.946856181	-0.29777988
min. průmět	0.899434987	0.984395211	0.91965323	0.959994333	1	0.989983415	-0.273085432
max. průmět 90	0.91072121	0.980448281	0.914573761	0.946856181	0.989983415	1	-0.260173089
kruhovitost	-0.079027477	-0.279838486	-0.100044656	-0.29777988	-0.273085432	-0.260173089	1

Kompozit č. 3

Tab. 13: Matrice, druh č.3 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.91519248	0.941322394	0.840438724	0.928708946	0.919482461	-0.046264507
ekv. Průměr	0.91519248	1	0.803868257	0.95996094	0.982820259	0.983401462	-0.214516437
obvod	0.941322394	0.803868257	1	0.79255279	0.779009872	0.790974573	-0.127574295
max.průmět	0.840438724	0.95996094	0.79255279	1	0.931368744	0.931672504	-0.251673875
min. průmět	0.928708946	0.982820259	0.779009872	0.931368744	1	0.996986069	-0.197792798
max. průmět 90	0.919482461	0.983401462	0.790974573	0.931672504	0.996986069	1	-0.20251355
kruhovitost	-0.046264507	-0.214516437	-0.127574295	-0.251673875	-0.197792798	-0.20251355	1

Kompozit č. 4*Tab. 14: Matrice, druh č.4 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů*

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.971138954	0.964781186	0.918473773	0.971618697	0.97256484	-0.039534684
ekv. Průměr	0.971138954	1	0.782697229	0.96166397	0.994652559	0.995106302	-0.156093587
obvod	0.964781186	0.782697229	1	0.781819913	0.778155242	0.764631482	-0.042993928
max.průmět	0.918473773	0.96166397	0.781819913	1	0.947635816	0.945797763	-0.19547345
min. průmět	0.971618697	0.994652559	0.778155242	0.947635816	1	0.996647973	-0.156885032
max. průmět 90	0.97256484	0.995106302	0.764631482	0.945797763	0.996647973	1	-0.153897768
kruhovitost	-0.039534684	-0.156093587	-0.042993928	-0.19547345	-0.156885032	-0.153897768	1

Kompozit č. 5*Tab. 15: Matrice, druh č.5 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů*

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.927726535	0.945595009	0.910111895	0.934594533	0.945932753	0.945932753
ekv. Průměr	0.927726535	1	0.889402322	0.992104113	0.980171257	0.984886397	-0.199990014
obvod	0.945595009	0.889402322	1	0.897274282	0.927876567	0.903358839	-0.07144387
max.průmět	0.910111895	0.992104113	0.897274282	1	0.964744263	0.965537825	-0.199731017
min. průmět	0.934594533	0.980171257	0.927876567	0.964744263	1	0.994898818	-0.20698081
max. průmět 90	0.945932753	0.984886397	0.903358839	0.965537825	0.994898818	1	-0.19239767
kruhovitost	0.945932753	-0.199990014	-0.07144387	-0.199731017	-0.20698081	-0.19239767	1

Kompozit č. 6*Tab. 16: Matrice, druh č.6 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů*

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.93576515	0.995056215	0.896996135	0.958089732	0.953321653	-0.022747076
ekv. Průměr	0.93576515	1	0.940957097	0.985083453	0.988713973	0.992187776	-0.135017391
obvod	0.995056215	0.940957097	1	0.896630254	0.966769816	0.96116289	-0.029457351
max.průmět	0.896996135	0.985083453	0.896630254	1	0.953427506	0.961342589	-0.156710805
min. průmět	0.958089732	0.988713973	0.966769816	0.953427506	1	0.998792208	-0.12304121
max. průmět 90	0.953321653	0.992187776	0.96116289	0.961342589	0.998792208	1	-0.121432728
kruhovitost	-0.022747076	-0.135017391	-0.029457351	-0.156710805	-0.12304121	-0.121432728	1

4.2.2 Vzduchové bubliny

I v případě vzduchových bublin vyšly korelační koeficienty u všech druhů kompozitů s poměrně silnou přímou korelační závislostí. Nejvyšší závislost na ploše byla opět pozorována u obvodu. Oproti korelačním koeficientům u matrice je zde ale pozorována ještě nepatrně vyšší závislost. Opět jediným parametrem, který zde vybočuje, je kruhovitost, jejíž závislost na ostatních parametrech je velmi slabá. Důvod je zde stejný, jako v případě matrice.

Kompozit č. 1

Tab. 17: Vzduchové bubliny, druh č.1 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.961732024	0.999092997	0.939029144	0.963997193	0.968223171	-0.113826528
ekv. Průměr	0.961732024	1	0.97081603	0.989167803	0.996008093	0.989849229	-0.231832029
obvod	0.999092997	0.97081603	1	0.951952216	0.972818391	0.97638838	-0.136970059
max.průmět	0.939029144	0.989167803	0.951952216	1	0.981009003	0.997497185	-0.288980464
min. průmět	0.963997193	0.996008093	0.972818391	0.981009003	1	0.996548023	-0.221019193
max. průmět 90	0.968223171	0.989849229	0.97638838	0.998971088	0.996548023	1	-0.212573111
kruhovitost	-0.113826528	-0.231832029	-0.136970059	-0.288980464	-0.221019193	-0.212573111	1

Kompozit č. 2

Tab. 18: Vzduchové bubliny, druh č.2 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.933806713	0.997438946	0.950427044	0.942693612	0.95785444	-0.175249178
ekv. Průměr	0.933806713	1	0.949672636	0.99084531	0.991915167	0.991122463	-0.318598244
obvod	0.997438946	0.949672636	1	0.967744273	0.952738294	0.966438365	-0.205151192
max.průmět	0.950427044	0.99084531	0.967744273	1	0.979272434	0.982726927	-0.306833058
min. průmět	0.942693612	0.991915167	0.952738294	0.979272434	1	0.99814253	-0.286941077
max. průmět 90	0.95785444	0.991122463	0.966438365	0.982726927	0.99814253	1	-0.270513952
kruhovitost	-0.175249178	-0.318598244	-0.205151192	-0.306833058	-0.286941077	-0.270513952	1

Kompozit č. 3

Tab. 19: Vzduchové bubliny, druh č.3 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.935471932	0.951312866	0.894717294	0.910060973	0.915193302	-0.200674489
ekv. Průměr	0.935471932	1	0.967586693	0.962897541	0.986221751	0.988197295	-0.311821898
obvod	0.951312866	0.967586693	1	0.983926731	0.949694313	0.951450282	-0.278567886
max.průmět	0.894717294	0.962897541	0.983926731	1	0.937586212	0.938267311	-0.343898254
min. průmět	0.910060973	0.986221751	0.949694313	0.937586212	1	0.999451261	-0.301676083
max. průmět 90	0.915193302	0.988197295	0.951450282	0.938267311	0.999451261	1	-0.299867896
kruhovitost	-0.200674489	-0.311821898	-0.278567886	-0.343898254	-0.301676083	-0.299867896	1

Kompozit č. 4*Tab. 20: Vzduchové bubliny, druh č.4 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů*

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.937881996	0.967915173	0.930101119	0.921219998	0.912625278	-0.270265762
ekv. Průměr	0.937881996	1	0.971658057	0.985603371	0.987523419	0.985174301	-0.391240177
obvod	0.967915173	0.971658057	1	0.984905554	0.963805673	0.955122549	-0.363681095
max.průmět	0.930101119	0.985603371	0.984905554	1	0.976110496	0.968067195	-0.427193856
min. průmět	0.921219998	0.987523419	0.963805673	0.976110496	1	0.997056679	-0.386277537
max. průmět 90	0.912625278	0.985174301	0.955122549	0.968067195	0.997056679	1	-0.38213765
kruhovitost	-0.270265762	-0.391240177	-0.363681095	-0.427193856	-0.386277537	-0.38213765	1

Kompozit č. 5*Tab. 21: Vzduchové bubliny, druh č.5 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů*

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.990366885	0.998523731	0.882246889	0.994938119	0.996509232	-0.122945816
ekv. Průměr	0.990366885	1	0.995395696	0.924100646	0.998163296	0.997600516	-0.182960105
obvod	0.998523731	0.995395696	1	0.905940656	0.996972516	0.997937791	-0.141951795
max.průmět	0.882246889	0.924100646	0.905940656	1	0.902296783	0.899396882	-0.263150684
min. průmět	0.994938119	0.998163296	0.996972516	0.902296783	1	0.999767024	-0.164846257
max. průmět 90	0.996509232	0.997600516	0.997937791	0.899396882	0.999767024	1	-0.156891381
kruhovitost	-0.122945816	-0.182960105	-0.141951795	-0.263150684	-0.164846257	-0.156891381	1

Kompozit č. 6*Tab. 22: Vzduchové bubliny, druh č. 6- korelační koeficienty jednotlivých parametrů*

	plocha	ekv. průměr	obvod	max. průmět	min. průmět	max. průmět 90	kruhovitost
plocha	1	0.92708257	0.966839128	0.883257095	0.968503824	0.965354642	-0.204811447
ekv. Průměr	0.92708257	1	0.975028495	0.967529942	0.975994706	0.978348799	-0.351899308
obvod	0.966839128	0.975028495	1	0.968801585	0.98150975	0.980995954	-0.304140653
max.průmět	0.883257095	0.967529942	0.968801585	1	0.9265019	0.927572087	-0.380834799
min. průmět	0.968503824	0.975994706	0.98150975	0.9265019	1	0.998962578	-0.294448474
max. průmět 90	0.965354642	0.978348799	0.980995954	0.927572087	0.998962578	1	-0.296952516
kruhovitost	-0.204811447	-0.351899308	-0.304140653	-0.380834799	-0.294448474	-0.296952516	1

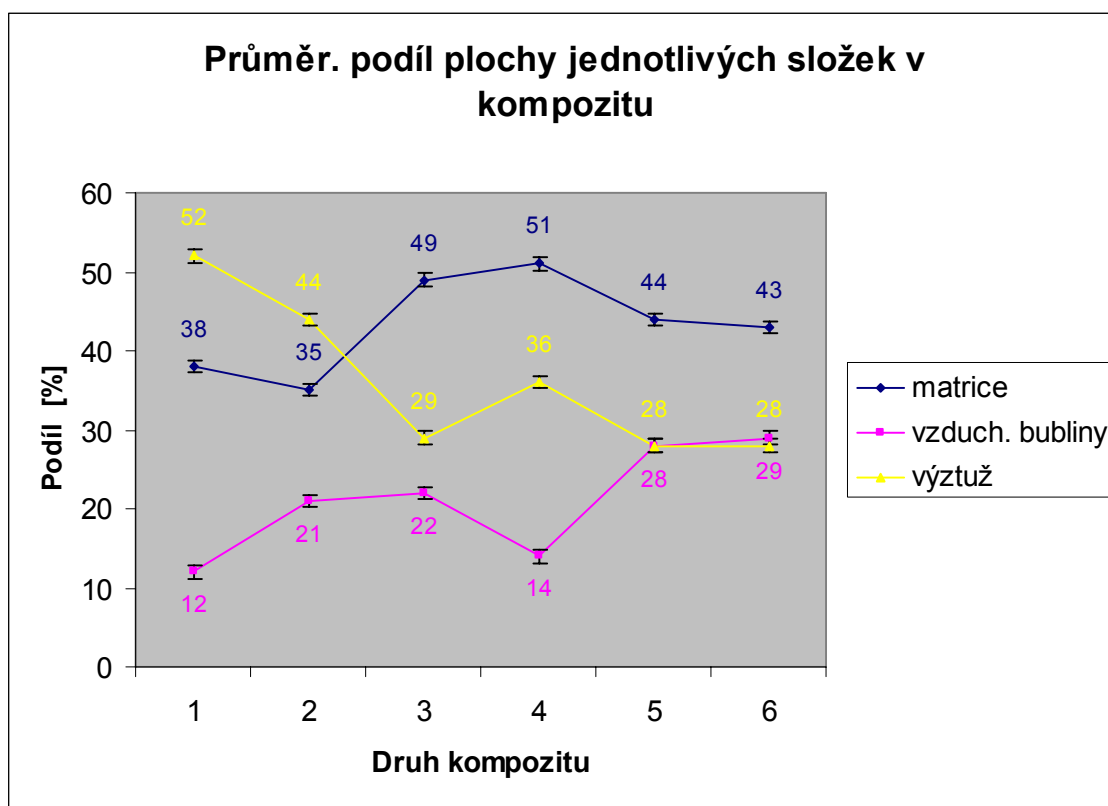
4.3 Podíl ploch jednotlivých složek v kompozitu

Dalším z přínosů práce je vytvoření a porovnání průměrného zastoupení složek v kompozitu, zanesené do Tab. 21. Z výsledků této tabulky je vytvořen graf (Obr. 4.3.1), ve kterém jsou zastoupeny všechny tři složky.

Tab. 23: Průměrný podíl jednotlivých složek v kompozitu

Podíl matrice [%]		Podíl vzduchu [%]		Podíl vlák. výztuže [%]		
		Průměr		Průměr	Průměr	
Kompozit č.1	52	38	3	12	45	52
Kompozit č.1-1.1	41		17		42	
Kompozit č.1-1.2	22		16		62	
Kompozit č.2	40	35	27	21	33	44
Kompozit č.2-2.1	45		20		35	
Kompozit č.2-2.2	21		17		62	
Kompozit č.3	45	49	18	22	37	29
Kompozit č.3-3.1	50		40		10	
Kompozit č.3-3.2	53		8		39	
Kompozit č.4	39	51	22	14	39	36
Kompozit č.4-4.1	61		5		34	
Kompozit č.4-4.2	49		14		37	
Kompozit č.5	15	44	47	28	38	28
Kompozit č.5-5.1	58		14		28	
Kompozit č.5-5.2	60		24		16	
Kompozit č.6	67	43	8	29	25	28
Kompozit č.6-6.1	37		30		33	
Kompozit č.6-6.2	24		50		26	

Grafické porovnání průměrného procentuálního zastoupení jednotlivých složek v kompozitu:



Obr. 4.3.1 Graf zastoupení jednotlivých složek v kompozitu

Z grafu zastoupení jednotlivých složek v kompozitu je patrné, že největší podíl výztuže byl zjištěn u druhu kompozitu č.1 a č.2. Je to dáno typem kompozitu, který je složen ze 2 pletenin. Tento výsledek lze předpokládat díky tomu, že pletenina není stlačována tkaninami, jako u ostatních druhů a tím je dána její volnější struktura a více plochy v prostoru, který pletenina v příčném řezu zaujímá. Tomuto předpokladu také odpovídají druhy č.5 a č.6, které mají podíl výztuže nejnižší. Dále je patrná klesající tendence u druhů č.1 až č.3, což může být zapříčiněno způsobem kladení (osnova – sloupky, útek – řádky). V celém experimentu se vymykají hodnoty u druhu č. 4. Tyto hodnoty jsou nejspíše dány blíže neurčeným jevem při výrobě pleteniny nebo při výrobě samotného kompozitu, jako je např. seskupení více vláken do příčného řezu. Jedním z důvodů může být také náhodný výběr místa s nízkou koncentrací vzduchu v kompozitu.

Podíl zastoupení matrice vzrostl přidáním tkaniny k pletenině, a to hlavně u druhů, které mají pouze krajní vrstvy tkanin. To je dáno lepším uzavřením pryskyřice v pletenině právě díky krajním tkaninám. U druhů č. 5 a č.6 vyšel podíl matrice nižší, což může být tím, že prostřední vrstva tkaniny od sebe odděluje obě pleteniny, tudíž pleteniny tolik nezapadnou do sebe. To má za následek porušení celistvosti pryskyřice v této oblasti a také její vytlačování z kompozitu.

Podíl vzduchových bublin by podle předpokladu měl růst s růstem použitých vrstev tkaniny, protože pletenina je přizpůsobivější a tudíž se při procesu výroby u lisování vytlačí více vzduchu než u pevné tkaniny, která vzduch zadržuje, jak je patrné u druhu č. 5 a č.6.

5 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Ze všech dílčích výsledků provedených v práci je patrné, že přidání vrstev tkanin k vrstvám pletenin znatelně ovlivňuje řadu strukturních prvků v kompozitu.

Podíl matrice je značně ovlivněn přidáním tkaniny k pletenině. Se vzrůstajícím počtem tkanin se tento podíl zvyšuje. To ukazuje na fakt, že tkanina pryskyřici v pletenině uzavře a zamezí tak jejímu vytékání při výrobě. Ovšem dalším zajímavým výsledkem je to, že u druhů č.5 (pletenina po sloupcích, tkanina po osnově) a č.6 (pletenina po řádcích, tkanina po útku), které měly tkaninu umístěnu ještě uprostřed kompozitu - mezi pletenými vrstvami, je podíl matrice nižší, než u druhů č.3 (pletenina po sloupcích, tkanina po osnově) a č.4 (pletenina po řádcích, tkanina po útku), které měly tkaniny umístěny pouze po krajích kompozitu. To může být následek toho, že prostřední vrstva tkaniny, rozděluje prostor mezi pleteninami a tím narušuje celistvost celého prostoru. Pokud se střídají vrstvy, pleteniny nejsou v kontaktu a nezapadají do sebe. To podporuje i výsledek další v práci provedené zkoušky – *Měření průměrných parametrů (4.1)*. Ta popisuje, že u druhů č.1 (pletenina po řádcích) a č.2 (pletenina po sloupcích) jsou největší *průměrné plochy* o *obvody* objektů matrice, což by mohlo ukazovat na velké celistvé plochy, které se mezi pleteninami nacházejí. Pro jasné stanovisko by ale bylo třeba provést větší počet potvrzujících zkoušek, že tkanina vložená doprostřed kompozitu je z hlediska přijetí pryskyřice kompozitem nadbytečná, nebo dokonce kompozitu tzv. škodí. Zajímavý výsledek nabízí porovnání druhu č.1 (pletenina po řádcích) a druhu č.2 (pletenina po sloupcích). Je zde patrné, že podíl matrice u druhu č.1 (pletenina po řádcích) je vyšší, než u druhu č.2 (pletenina po sloupcích). Důvodem může být nižší pevnost druhu č.1 (pletenina po řádcích), jeho vyšší deformace a tím vyšší podíl matrice na úkor vzduchových bublin. Ukazuje se, že kombinace pouze dvou pletenin řezaných a broušených po řádcích neuzavírá ve struktuře tolik vzduchu.

Výsledky, týkající se vzduchových bublin naznačují, že jejich podíl na ploše kompozitu roste s přidáním vrstev tkaniny. To může být zapříčiněno tím, že přidáním tkaniny se kompozit stává pevnějším a méně pružným. Tzn. pleteniny ztrácí svou pružnost a vzduch z nich nemůže odcházet. Jako další faktor se ukazuje, že krajní vrstvy tkaniny zabraňují odvodu vzduchu z kompozitu -jako v případě matrice i toto naznačuje již zmiňovaná zkouška (4.1.) prováděná v práci. Na grafech je dále patrné, že parametry *minimální průmět* a *maximální průmět* mají směrem ke kompozitům s nejvíce vrstvami

– druhy. č.5 (pletenina po sloupcích, tkanina po řádcích) a č.6 (pletenina po řádcích, tkanina po útku), klesající tendenci. Je tedy pozorováno, že i když mají tyto druhy největší podíl plochy vzduchových bublin, mají také nejnižší hodnoty *minimálního* a *maximálního průmětu*. Pro jednoznačný výsledek by bylo potřeba provést více měření. Zatím z výsledků vyplývá, že vzduchové bubliny se působením tlaku sice rozčlení na menší útvary, ale zůstanou vázány na tkaniny, které je zadržují. Výjimkou je zde druh kompozitu č.4 (pletenina po řádcích, tkanina po útku), jehož plocha vzduchových bublin je velmi nízká. Důvodem může být způsob vrstvení kompozitu útek-řádka. Takto strukturovaný kompozit má v námi zkoušeném směru nižší pevnost, než kombinace osnova-sloupky (poznatek z konzultací s Bc. M. Hovorkovou). Při zvýšeném tlaku lisu mohlo dojít k zborcení kompozitu, kdy útek neudržel řádky pleteniny. Tím došlo k velkému úniku vzduchových bublin z kompozitu. Za povšimnutí stojí i fakt, že druh. č.1 (pletenina po řádcích) má podíl plochy vzduchových bublin nižší, než druh. č.2 (pletenina po sloupcích). Mohlo by to být pevnější strukturou ve směru sloupků, která se tolik nedeformuje a tím zadržuje vzduchové bubliny v kompozitu.

Poslední složkou v kompozitu je vlákenná výztuž. Tato složka je velmi obtížně prahovatelná a popsání jí samotné a jejího chování je velmi obsáhlé. Musely by být voleny sofistikovanější postupy zpracování obrazu a tím získání hodnot této složky. To by ale výrazně přesáhlo obsah a rozmezí této práce a mohlo by to být samotným tématem. Proto je tento parametr dopočítán pomocí předchozích dvou složek. Z výpočtů vyplývá, že se podíl vlákenné výztuže snižuje s přibývajícemi vrstvami tkaniny - může být příznak vyššího stlačení, které s přibývajícemi vrstvami narůstá. Pletenina je tím u druhů. č.5 (pletenina po sloupcích, tkanina po osnově) a č.6 (pletenina po řádcích, tkanina po útku) stlačenější než u druhů č.1 (pletenina po řádcích) a č.2 (pletenina po sloupcích) a obsah vlákenné výztuže v ploše není tak vysoký. V případě samostatných pletenin mají pleteniny volnější strukturu a tím jsou objemnější, nedeformované. To se projevuje v jejich průřezu. Další z možností, jak si lze tento jev vysvětlit, by mohla být kombinace kladení, která má vliv na podíl plochy vlákenné výztuže. To je patrné s postupně klesající tendencí směrem k druhům s více vrstvami. U vlákenné výztuže se opět vymyká kompozit č.4 (pletenina po řádcích, tkanina po útku). Nejsou k dispozici výsledky z prahování, jako tomu je u ostatních dvou složek. Může to ale být způsobeno podobným chováním struktury, jaké je popsáno u vzduchových bublin. Tzn. díky nižším mechanickým vlastnostem po směru útek-řádka došlo ke zborcení kompozitu při slisování a tím ke snížení podílu vláken v průřezu.

6 ZÁVĚR

Tato práce je jednou z prvních prací, která se zabývá geometrií a strukturou čedičových kompozitů a hlavně kombinací čedičové tkaniny a čedičové pleteniny. Práce je také prvotním průzkumem strukturních parametrů takovýchto kompozitů. Byly zde studovány vyrobené kompozity hlavně z hlediska makropohledu a sledovány imperfekce ve struktuře kompozitu jako celku. Kompozit jako celek byl studován z geometrického pohledu, ne z pohledu materiálového. Geometrii výztuže, jako je např. množství a tvar objektů matrice v kompozitu nebo množství a tvar vzduchových bublin v kompozitu, je důležité sledovat jako součást modelování výsledných vlastností kompozitu.

Dále bylo zkoumáno, jaký vliv mají tyto kombinace struktury (tkanina-pletanina) na vtékání a vytékání pryskyřice z kompozitu, její plošný podíl, plošný podíl vzduchových bublin, výztuže a vzájemné korelace těchto složek. Byl prokázán vliv přidání vrstev tkaniny k pletenině na strukturu kompozitu. Z hlediska matrice došlo se zvýšením počtu vrstev i ke zvýšení podílu matrice, kromě druhů s nejvyšším počtem vrstev. Plocha vzduchových bublin měla s přidáním vrstev kompozitu zvyšující se tendenci, a to až na jednu výjimku. Oproti tomu vlákenná výztuž měla opačnou, tedy snižující se tendenci. Opět s jednou výjimkou (*Kap. 5 - Diskuze výsledků*).

Cíle práce byly splněny podle zadání, práce dává kvalitní základy pro další, hlubší rozborů těchto kompozitů. V práci se nacházejí cenné poznatky, které mohou být dále rozvíjeny a zdokonalovány pro potřeby pochopení takovýchto typů struktur. Nabízí se např. postupné odbrušování a snímání jednoho druhu příčného nábrusu, snímání nábrusů za různých světelných podmínek, detailnější a přesnější hodnocení vlákenné výztuže, snímání na jiných typech zařízení nebo na úrovni mikropohledu a to jak u již vyrobených příčných nábrusů nebo nových kombinací vrstvení kompozitů.

7 ČÍSELNÝ SEZNAM

7.1 Obrázky

Obr.	str.
1.2.1 Průřez pleteným kompozitem, kolmo na směr sloupků	13
1.2.2 Přehled a porovnání vlastností výztuže	14
2.2.1 Příklad kompozitu s textilní výztuží	17
2.2.2 Geometrie vlákenné výztuže	17
2.2.3 Typická podoba horniny	20
2.2.4 Obrázek čedičového vlákna v lomu	21
2.2.5 Čedičový roving.	21
2.2.6 Doba vytvrzení kompozitu v závislosti na teplotě	25
2.3.1 Bublinový pór v kompozitu	29
2.3.2 Trhlina v kompozitu	29
2.3.3 Dutina v kompozitu	30
3.1.1 Postup výroby kompozitu	36
3.1.2 Čedičová tkanina, vazba plátno	37
3.1.3 Pletenina použitá v kompozitu	38
3.1.4 Schéma řezů kompozitem	39
3.1.5 Balení Lukosilu M130	40
3.1.6 Plechy pro správné slisování	40
3.1.7 Pec potřebná k vytvrzení kompozitu	40
3.1.8 Speciální papíry	40
3.2.1 Kotoučová pila	41
3.2.2 Svěrák + pilka + vzorky	41
3.2.3 Použitý Dentacryl	42
3.2.4 Vzorky v pouzdře fotofilmu	42
3.2.5 Speciální bruska	43
3.2.6 Hlavičky brusky	43
3.2.7 Smirkový papír a diamantová pasta	44
3.2.8 Výsledné příčné nábrusy	44
3.3.1 Snímací sestava	45
3.3.2 Pomocný lis	46

3.3.3 Příčný nábrus – druh č. 1	47
3.3.4 Příčný nábrus – druh č. 2	47
3.3.5 Příčný nábrus – druh č. 3	48
3.3.6 Příčný nábrus – druh č. 4	49
3.3.7 Příčný nábrus – druh č. 5	49
3.3.8 Příčný nábrus – druh č. 6	50
3.3.9 Vytržené vlákno	51
3.3.10 Zalévací hmota ve vzduchové bublině mezi vlákennými vrstvami	51
3.3.11 Vzduchová bublina, trhlina mezi vlákennými vrstvami	52
3.3.12 Zvrásnění matrice	53
3.3.13 Lom multifilu v rámci tkaniny	54
3.4.1 Segmentace matrice z kompozitu	54
3.4.2 Segmentace vzduchových bublin z kompozitu	54
3.4.3 Ekvivalentní průměr	55
3.4.4 Maximální průmět 90	56
4.1.1 Graf závislosti průměrné plochy na druhu kompozitu	58
4.1.2 Graf závislosti ekvivalentního průměru na druhu kompozitu	58
4.1.3 Graf závislosti obvodu na druhu kompozitu	59
4.1.4 Graf závislosti maximálního průmětu na druhu kompozitu	59
4.1.5 Graf závislosti minimálního průmětu na druhu kompozitu	60
4.1.6 Graf závislosti maximálního průmětu 90 na druhu kompozitu	60
4.1.7 Graf závislosti kruhovitosti na druhu kompozitu	61
4.1.8 Graf výsledků průměrných hodnot jednotlivých parametrů	61
4.1.9 Graf závislosti plochy na druhu kompozitu	62
4.1.10 Graf závislosti ekvivalentního průměru na druhu kompozitu	63
4.1.11 Graf závislosti obvodu na druhu kompozitu	63
4.1.12 Graf závislosti maximálního průmětu na druhu kompozitu	64
4.1.13 Graf závislosti minimálního průmětu na druhu kompozitu	64
4.1.14 Graf závislosti maximálního průmětu 90 na druhu kompozitu	65
4.1.15 Graf závislosti kruhovitosti na druhu kompozitu	65
4.1.16 Graf výsledků průměrných hodnot jednotlivých parametrů	66
4.3.1 Graf zastoupení jednotlivých složek v kompozitu	72

7.2 Tabulky

Tab.	str.
1. Důležité parametry Lukosilu M130	24
2. Posloupnost strukturních úrovní	26
3. Velikosti pórů	28
4. Plošný rozdíl mezi defekty	32
5. Hodnoty cyklů broušení	42
6. Hodnoty leštících cyklů	43
7. Podmínky snímání	45
8. Postup segmentace objektů	54
9. Matrice - průměrné hodnoty naměřených parametrů	56
10. Vzduchové bubliny – průměrné hodnoty naměřených parametrů	62
11. Matrice, druh č.1 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	67
12. Matrice, druh č.2 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	67
13. Matrice, druh č.3 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	67
14. Matrice, druh č.4 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	68
15. Matrice, druh č.5 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	68
16. Matrice, druh č.6 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	68
17. Vzduchové bubliny, druh č.1 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	69
18. Vzduchové bubliny, druh č.2 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	69
19. Vzduchové bubliny, druh č.3 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	69
20. Vzduchové bubliny, druh č.4 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	70
21. Vzduchové bubliny, druh č.5 - korelační koeficienty jednotlivých parametrů	70
22. Vzduchové bubliny, druh č.6- korelační koeficienty jednotlivých parametrů	70
23. Průměrný podíl jednotlivých složek v kompozitu	71

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Jortner, J.: Macroporosity and interface cracking in multi-directional carbon-carbon. Great Britain, 1986.
- [2] Jortner, J.: Microstructure of cloth. Great Britain, 1992.
- [3] Svoboda, M.: Analýza obrazu počítačem. Medsoft, Praha, 1989.
- [4] Burešová, M.: Měření objemového podílu vláken v kompozitech metodou obrazové analýzy. Strutex, TU Liberec, 1997.
- [5] Agarwal, D.: Vláknové kompozity. SNTL, Praha, 1988.
- [6] Gao, F.: The characterisation of cracks and voids in composites. Great Britain, 1993.
- [7] Mencáková, R.: Studium vlastností kompozitů s epoxidovou maticí. DP, TU Liberec, 1995.
- [8] Bednářová, M.: Analýza struktury bavlněných vláken. DP TU Liberec, 1995.
- [9] Mazal, M.: Analýza struktury defektů v tkaninových kompozitech C-C. DP, TU Liberec, 2003.
- [10] Vozková, P.: Analýza strukturních defektů v tkaninovém kompozitu. DP, TU Liberec, 2003.
- [11] NIS-Elements: Uživatelská příručka – verze 3.0. Laboratoř Paging s.r.o., 2008.
- [12] Salačová, J.: Možnosti počítačového vidění reálné struktury tkaninových kompozitů. DisP, TU Liberec, 2008.
- [13] Reber, R.: Micro and macromechanical properties of knitted fabric reinforced composites. DisP, Swiss Federal Institute Zurich, 2001.
- [14] Gommers, B.: Analysis of knitted fabric reinforced composites. Catholic University Leuven, 2002.
- [15] Savci, S.: A study of the deformation knit for advanced composite structures. University of New South Wales Sydney, 2005.
- [16] Petránek, J.: Bazalt - Geologická encyklopedie.
[<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.?bazalt>],
15.12.2009.
- [17] Kunteová, P.: Dynamicko-mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s pletenou čedičovou a skleněnou výztuží. DP, TU Liberec 2009.

- [18] Firma Lučební závody a.s. Kolín, [<http://www.lucebni.cz/main.php?action=prum>], 16.12.2009.
- [19] Balík, K.: Mikrostruktura a mechanické vlastnosti tepelně odolných a chemicky stálých kompozitů vyztužených čedičovými vlákny. Ústav struktury a mechaniky hornin, [<http://www.irsm.cas.cz/File=Obsah/Projects>], 11.12.2009.
- [20] Kořínek, Z.: Kompozity. [<http://www.volny.cz/zkorinek/>], 7.1.2010.
- [21] Lidařík, M.: Epoxidové pryskyřice, SNTL Praha 1961
- [22] Skriptum TU Liberec [http://www.ft.vslib.cz/depart/ktt/textilie5/pdft5/t5_05.pdf], 11.2.2010.
- [23] Skriptum TU Liberec [<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20091005/01.pdf>], 15.3.2010.
- [24] Ptáčková, K.: Geometrické parametry kontinuálních čedičových vláken. DP, TU Liberec, 2007.
- [25] Skriptum TU Liberec [<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20091007/02.pdf>], 17.12.2009.
- [26] Firma Basaltex a.s. Šumperk, [<http://www.basaltex.cz/>], 3.5.2010.